

Universidade de Lisboa

Faculdade de Medicina Dentária



Fidelidade e precisão de modelos de trabalho reproduzidos  
pelas técnicas convencional, de fresagem e de impressão 3D

Joana Raquel Lima Hermínio

Orientador:

Professor Doutor João Tiago Cardoso Gonçalves Mourão

Dissertação

Mestrado Integrado em Medicina Dentária

2021



Universidade de Lisboa

Faculdade de Medicina Dentária



Fidelidade e precisão de modelos de trabalho reproduzidos  
pelas técnicas convencional, de fresagem e de impressão 3D

Joana Raquel Lima Hermínio

Orientador:

Professor Doutor João Tiago Cardoso Gonçalves Mourão

Dissertação

Mestrado Integrado em Medicina Dentária

2021



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Diogo Viegas, pelo desafio, pelo voto de confiança e por todo o apoio, incentivo e motivação que teve para comigo no decorrer deste trabalho. O seu percurso é para mim um exemplo e orgulho-me de tê-lo como mentor, uma referência para a minha vida profissional.

Ao Prof. Dr. João Tiago Mourão, por toda a confiança e ajuda, e também ao técnico de Prótese Dentária João Pedro Fernandes, ao Dr. Fernando Arrobas, ao Prof. Dr. João Carlos Roque e ao Prof. Dr. Guilherme Saavedra, porque o trabalho em equipa é mais rico e por isso capaz de alcançar os melhores resultados.

À Inês Luís e à Marisa Antunes, por terem dado vida e alegria a todas as horas passadas na faculdade e por todos os momentos de partilha e união.

Ao Gonçalo, por nunca abandonar o barco, pela força e perseverança, mesmo quando rumamos constantemente contra a maré.

À minha família, que sorte tenho em ter-vos comigo!



## RESUMO

Introdução: A importância da reprodução de modelos de trabalho físicos no sucesso do tratamento em Prostodontia Fixa deve-se à necessidade de avaliar a adaptação da peça protética antes da sua inserção na cavidade oral. Produzir modelos com tecnologia digital é ainda um processo dispendioso, contudo diminui o risco de erro humano associado à técnica convencional.

Objetivo: Comparar a fidelidade e precisão de reprodução de modelos de trabalho pelas técnicas convencional, de fresagem e de impressão 3D.

Material e métodos: A partir de um modelo de referência (MR) de uma hemi-arcada superior direita, foram obtidos 72 modelos divididos em três grupos: convencionais (MC), fresados (MF) e impressos (MI). Todos foram digitalizados e convertidos sob a forma de ficheiros *Standard Tessellation Language* (.STL). Os ficheiros foram sobrepostos utilizando um *software* de análise 3D e através dos valores de raiz quadrada média (RMS) obtidos foi realizada a análise estatística. Para avaliação da normalidade foi utilizado o teste *Shapiro Wilk* e para a comparação entre grupos foi utilizado o teste *Kruskal-Wallis* ( $p < \alpha$ ;  $\alpha = 0,05$ ). Para as comparações múltiplas entre grupos, foi utilizado o teste *U de Mann-Whitney* ( $p < \bar{\alpha}$ ;  $\bar{\alpha} = 0,017$ ).

Resultados: Existem diferenças significativas de fidelidade ( $p = 0,000$ ;  $p < 0,001$ ) e precisão ( $p = 0,000$ ;  $p < 0,001$ ) entre os três grupos. Em relação à fidelidade, MC apresentou melhores resultados, seguido por MF e MI. Em relação à precisão, MF apresentou melhores resultados, seguido por MI e MC, que não apresentaram diferenças significativas entre si.

Conclusão: Para reprodução de modelos de trabalho, a técnica convencional é a que apresenta maior fidelidade e a técnica de fresagem a que apresenta maior precisão.

Palavras-chave: fidelidade, precisão, fresagem, impressão 3D, modelo de trabalho.





## **ABSTRACT**

Introduction: The importance of dental cast reproduction to treatment success in fixed prosthodontics arises from the need to evaluate the adaptation of the prosthetic piece before placement in the oral cavity. The production of models using digital technology is still expensive, but it reduces the risk of human error associated with the conventional technique.

Purpose: To compare the reproduction trueness and precision of dental casts made by the conventional, milling and 3D printing techniques.

Material and Methods: From an upper right side half-arch reference model (RM), 72 models were obtained and divided into three groups: conventional (CM), milled (MM) and printed (PM). All models were scanned and converted into standard tessellation language (.STL) files. The files were superimposed using 3D analysis software and statistical analysis was performed using the root mean square (RMS) values obtained. The Shapiro-Wilk test was used to assess normality, and the Kruskal-Wallis test was used to compare groups ( $\rho < \alpha$ ;  $\alpha = 0,05$ ). The Mann-Whitney U test was used for multiple comparisons among groups ( $\rho < \overline{\alpha}$ ;  $\overline{\alpha} = 0,017$ ).

Results: There were significant differences in trueness ( $\rho = 0,000$ ;  $\rho < 0,001$ ) and precision ( $\rho = 0,000$ ;  $\rho < 0,001$ ) among the three dental cast groups. Regarding trueness, CM presented better results, followed by MM and PM. Regarding precision, MM showed better results, followed by PM and CM, which did not show significant differences.

Conclusions: For dental cast reproduction the conventional technique has the best trueness and the milling technique has the best precision.

Keywords: trueness, precision, milling, 3D printing, dental cast.



## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. TÉCNICA CONVENCIONAL VS TÉCNICA DIGITAL DE FRESAGEM.....	3
1.2. TÉCNICA CONVENCIONAL VS TÉCNICA DIGITAL DE IMPRESSÃO 3D.....	3
1.3. TÉCNICA DE FRESAGEM VS TÉCNICA DE IMPRESSÃO 3D.....	3
2. OBJETIVOS.....	5
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	6
3.1. PRODUÇÃO DO MODELO DE REFERÊNCIA (MR).....	6
3.2. PRODUÇÃO DOS MODELOS CONVENCIONAIS (MC) [n=24] .....	6
3.3. PRODUÇÃO DOS MODELOS FRESADOS (MF) [n=24] .....	7
3.4. PRODUÇÃO DOS MODELOS IMPRESSOS (MI) [n=24] .....	8
3.5. ANÁLISE VOLUMÉTRICA TRIDIMENSIONAL.....	9
3.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	11
4. RESULTADOS.....	12
4.1. FIDELIDADE.....	12
4.2. PRECISÃO.....	13
5. DISCUSSÃO.....	16
5.1. VARIÁVEL DEPENDENTE FIDELIDADE.....	16
5.1.1. VARIÁVEL INDEPENDENTE TÉCNICA CONVENCIONAL E VARIÁVEL DEPENDENTE FIDELIDADE.....	16
5.1.2. VARIÁVEL INDEPENDENTE TÉCNICA DE FRESAGEM E VARIÁVEL DEPENDENTE FIDELIDADE.....	17
5.1.3. VARIÁVEL INDEPENDENTE TÉCNICA DE IMPRESSÃO 3D E VARIÁVEL DEPENDENTE FIDELIDADE.....	18
5.2. VARIÁVEL DEPENDENTE PRECISÃO.....	19
5.2.1. VARIÁVEL INDEPENDENTE TÉCNICA DE FRESAGEM E VARIÁVEL DEPENDENTE PRECISÃO.....	19
5.2.2. VARIÁVEL INDEPENDENTE TÉCNICA CONVENCIONAL E VARIÁVEL DEPENDENTE PRECISÃO.....	20

5.2.3. VARIÁVEL INDEPENDENTE TÉCNICA DE IMPRESSÃO 3D E VARIÁVEL DEPENDENTE PRECISÃO.....	20
6. CONCLUSÃO.....	23
7. BIBLIOGRAFIA.....	24
APÊNDICES:	
APÊNDICE A.....	31
APÊNDICE B.....	37
APÊNDICE C.....	43
APÊNDICE D.....	47
APÊNDICE E.....	53
APÊNDICE F.....	65
APÊNDICE G.....	71
APÊNDICE H.....	75
APÊNDICE I.....	81
APÊNDICE J.....	85

## **ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1: Avaliação do efeito do tipo de processo na fidelidade.....	12
Tabela 2: Avaliação do efeito do tipo de processo na fidelidade: comparações múltiplas..	13
Tabela 3: Avaliação do efeito do tipo de processo na precisão.....	14
Tabela 4: Avaliação do efeito do tipo de processo na precisão: comparações múltiplas....	15



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: MR representado na vista palatina (A) .....	6
Figura 2: MR representado na vista vestibular (B) .....	6
Figura 3: MR representado na vista oclusal (C) .....	6
Figura 4: Representação de uma moldeira individual confeccionada sob o modelo MR, na vista vestibular (A) .....	7
Figura 5: Representação de uma moldeira individual confeccionada sob o modelo MR, na vista palatina (B) .....	7
Figura 6: Imagem representativas da fresadora <i>M4 (ZirkohnZahn GmbH, Bruneck, Italy)</i> utilizada neste estudo .....	8
Figura 7: Imagem representativas da fresadora <i>M4 (ZirkohnZahn GmbH, Bruneck, Italy)</i> utilizada neste estudo .....	8
Figura 8: Imagem representativa da impressora <i>Form 2 (Formlabs Inc., Massachusetts, EUA)</i> utilizada neste estudo. ....	8
Figura 9: Representação da sobreposição de modelos no <i>software</i> de análise 3D ( <i>3D Systems, Rock Hill, Sacramento, USA</i> ) através da função <i>Best Fit Alignment</i> .....	9
Figura 10: Representação da metodologia de sobreposição de modelos utilizada como forma de avaliar a fidelidade e a precisão .....	10
Figura 11: Gráfico representativo do recorte do cálculo <i>à priori</i> da dimensão da amostra. ....	11





## LISTA DE ABREVIATURAS

CAD/CAM = *Computer-Aided Design/ Computer-Aided Manufacturing*

*.STL = Standard Tessellation Language*

*SLA = stereolithography*

*Polyjet = triple jetting technology*

*DLP = digital light processing*

UV = ultravioleta

MR = modelo de referência

MC = modelos convencionais

MF = modelos fresados

MI = modelos impressos

*RMS = raiz quadrada média*



## 1. Introdução:

Nos últimos anos, tem-se verificado um desenvolvimento exponencial do fluxo digital na área da Medicina Dentária. Esse facto deve-se ao desenvolvimento de tecnologia *Computer-Aided Design/ Computer-Aided Manufacturing* (CAD/CAM) que tem adquirido ênfase ao longo dos tempos maioritariamente nas áreas da Prostodontia, Dentisteria Operatória e Ortodontia.<sup>(1-3)</sup>

A tecnologia CAD/CAM divide-se em três componentes: a digitalização da informação com recurso a um *scanner*, o *software* de processamento e o componente de produção que converte essa informação num objeto físico com características pré-determinadas.<sup>(2,4)</sup>

A aquisição da geometria tridimensional das estruturas orais pode ser feita através de um *scanner* de tecnologia laser, de forma direta, intraoral, ou indireta a partir de um modelo de gesso. Comparativamente à técnica de impressão convencional, a impressão digital revelou ser mais rápida e confortável para o paciente, apresentando um nível de rigor compatível com as necessidades clínicas.<sup>(4-8)</sup>

Ao nível do processamento da informação adquirida, esta é organizada num sistema de coordenadas tridimensional. A superfície é reconhecida pelo *scanner* como uma nuvem de pontos.<sup>(9)</sup> O *software*, com algoritmos específicos, replica a imagem virtual agrupando, filtrando e convertendo as coordenadas detetadas.<sup>(9)</sup> A formatação digital é maioritariamente feita a partir de um ficheiro *Standard Tessellation Language* (.STL), agregado a um sistema de transferência de ficheiros.<sup>(4,9)</sup>

Assim, a Prostodontia digital possibilita a recriação de um modelo individual, digital ou físico, a três dimensões.<sup>(2)</sup> O modelo digital tem como vantagens a rapidez de execução, durabilidade, fácil armazenamento, mobilidade e envolve um menor número de procedimentos durante o plano de tratamento.<sup>(1,3,10)</sup> Os modelos de trabalho assumem uma extrema importância no diagnóstico e plano de tratamento em Prostodontia Fixa, tendo em conta que a adaptação é a principal característica necessária para garantir o sucesso da reabilitação e que sem um modelo físico, a adaptação entre o pilar e a peça protética não pode ser avaliada antes da sua inserção na cavidade oral.<sup>(4,11)</sup>

Produzir modelos físicos com recurso a tecnologia digital é ainda um processo dispendioso quando comparado à técnica convencional, mas assume a grande vantagem de

diminuir o risco de erro humano.<sup>(3,12)</sup> Na medicina dentária digital as discrepâncias em relação à realidade podem surgir a cada procedimento realizado, pelo que são consideradas como clinicamente aceitáveis alterações dimensionais de até 200 µm, sendo estas mais evidentes no eixo Z do plano tridimensional, o que realça a importância de aplicar a melhor e mais adequada tecnologia e os melhores materiais.<sup>(4,13,14)</sup>

A partir do sistema CAD/CAM, os modelos de trabalho físicos podem ser fabricados por subtração ou adição, respetivamente pelas técnicas de fresagem ou impressão 3D.<sup>(2)</sup>

No processo de subtração, um bloco ou disco de material é desgastado até atingir a geometria final desejada.<sup>(1)</sup> A capacidade de reprodução de detalhe de uma unidade de fresagem depende do seu número de eixos, das rotações que o bloco/disco consegue fazer sobre os eixos<sup>(3)</sup> e do diâmetro da broca utilizada, que deve ter uma espessura mínima com capacidade de resistência à fratura.<sup>(15,16)</sup> Esta técnica apresenta como desvantagens o desperdício de material associado ao desgaste do bloco inicial, o facto de apenas ser possível reproduzir um objeto por bloco/disco, a incapacidade de reproduzir anatomias complexas e a necessidade constante de manutenção dispendiosa do equipamento.<sup>(1,16)</sup>

Por outro lado, no processo de adição, o método de impressão 3D permite a recriação de objetos pela deposição de material polimerizável por camadas, e pode ter por base vários sistemas, tais como a *stereolithography (SLA)*, *triple jetting technology (PolyJet)*, ou *digital light processing (DLP)*.<sup>(17-19)</sup> A resolução de uma impressora traduz-se na medida mais pequena que consegue reproduzir em três dimensões.<sup>(4,20-22)</sup> Apresenta como vantagens o menor consumo de material, sendo reduzido em cerca de 40% comparativamente à técnica de subtração, possibilitando também a reciclagem de cerca de 95% a 98% do material remanescente (partículas em suspensão).<sup>(12)</sup> Permite também a reprodução de vários elementos ao mesmo tempo, economizando energia e tempo, tornando a prática clínica e laboratorial mais eficiente.<sup>(1)</sup>

A exatidão é definida como sendo a proximidade entre uma medida suposta e uma medida real de um objeto e é expressa em termos de fidelidade e precisão. A fidelidade representa o quão próximo está o valor real do valor suposto, enquanto que a precisão representa a proximidade de repetidas medições reais em relação ao valor suposto.<sup>(4,23)</sup>

Na literatura podemos verificar alguma discordância relativamente à exatidão associada à reprodução de modelos de trabalho pela técnica digital:

### 1.1.Técnica convencional VS técnica digital de fresagem:

Num estudo comparativo entre a exatidão associada à reprodução de modelos de trabalho pela técnica convencional e de fresagem, foram avaliados modelos de uma peça dentária individual, sendo a técnica convencional a que demonstrou melhores resultados. As diferenças foram mais significativas na área oclusal.<sup>(24)</sup>

### 1.2.Técnica convencional VS técnica digital de impressão 3D:

Na comparação entre modelos de trabalho convencionais e impressos pela técnica de *SLA*, alguns autores verificaram uma maior exatidão associada aos modelos de gesso convencionais.<sup>(25-27)</sup> Outros, por outro lado, não identificaram diferenças significativas.<sup>(28-30)</sup>

Quando avaliados modelos convencionais e impressos pelas técnicas de *SLA* e de *PolyJet*, verificou-se que o método convencional apresenta maior fidelidade e a técnica *PolyJet* maior precisão.<sup>(31)</sup> Entre modelos convencionais e impressos pelas técnicas de *DLP* e de *Polyjet*, os convencionais apresentaram melhores resultados de fidelidade e precisão pelas menores alterações dimensionais apresentadas. Contudo, de entre as técnicas de impressão 3D, a de *DLP* com polimerização ultravioleta (UV) foi a que apresentou melhores resultados.<sup>(32)</sup>

### 1.3.Técnica de fresagem VS técnica de impressão 3D:

Quando comparados modelos de uma arcada completa, fresados e impressos por *SLA*, a impressão 3D demonstrou resultados de exatidão superiores.<sup>(33)</sup> Outros autores, por outro lado, identificaram a técnica de fresagem como sendo mais fidedigna em comparação com a técnica de *polyjet*.<sup>(34)</sup> Um estudo mais recente demonstrou que os modelos impressos têm maior fidelidade e precisão comparativamente aos modelos fresados, contudo, os resultados obtidos colocaram em causa a sua aplicabilidade em Prostodontia.<sup>(35)</sup>

Foi também avaliada a exatidão de reprodução de modelos pelas técnicas convencional, de fresagem, de *SLA* e de *DLP*, implementando-as em preparações dentárias para *inlay*, coroa, ponte e modelo da arcada completa. Para a reprodução de arcada completa o modelo convencional apresentou maior exatidão, sendo que a técnica de fresagem foi a que apresentou melhores resultados de precisão gerais. Ao nível da fidelidade, nas preparações, foram obtidos resultados semelhantes para todas as técnicas.<sup>(36)</sup>

Na literatura é possível também confirmar que os modelos digitais, fresados e impressos, demonstram ter uma exatidão aceitável e compatível com a prática clínica em Protoprontia Fixa em várias situações: adaptação marginal das coroas sobre dentes <sup>(37-39)</sup>, adaptação marginal de *inlays* <sup>(40)</sup>, pontes dento-suportadas <sup>(41,42)</sup>, coroas sobre implantes <sup>(43)</sup> e pontes implanto-suportadas.<sup>(44)</sup> Em todos estes estudos foi a técnica de impressão 3D a que apresentou melhores resultados de precisão e fidelidade, exceto no caso da adaptação de *inlays* em que foi a fresagem a técnica com maior exatidão.<sup>(40)</sup>

O “fluxo digital” em Medicina Dentária tem demonstrado bons resultados de precisão e reprodutibilidade, associados a uma maior eficiência e diminuição do tempo de trabalho.<sup>(5,7)</sup> Clínicos e pacientes têm demonstrado satisfação relativamente aos resultados estéticos e funcionais associados a reabilitações fixas desenvolvidas através da tecnologia digital.<sup>(2,7)</sup>

O objetivo deste estudo é comparar a exatidão, em termos de fidelidade e precisão, associada à reprodução de modelos de trabalho físicos pelas técnicas convencional, de fresagem e de impressão 3D.

## 2. Objetivos:

O objetivo deste estudo é comparar a fidelidade e precisão de reprodução de modelos de trabalho pelas técnicas convencional, de fresagem e de impressão 3D.

Podemos assim definir as seguintes hipóteses de estudo:

I. Existência de diferenças significativas em relação à fidelidade utilizando o método convencional, de fresagem ou de impressão 3D, para obtenção do modelo de trabalho:

$H_0$  – Não existem diferenças significativas em relação à fidelidade utilizando o método convencional, de fresagem ou de impressão 3D, para obtenção do modelo de trabalho;

$H_1$  – Existem diferenças significativas em relação à fidelidade utilizando o método convencional, de fresagem ou de impressão 3D, para obtenção do modelo de trabalho.

II. Existência de diferenças significativas em relação à precisão utilizando o método convencional, de fresagem ou de impressão 3D, para obtenção do modelo de trabalho:

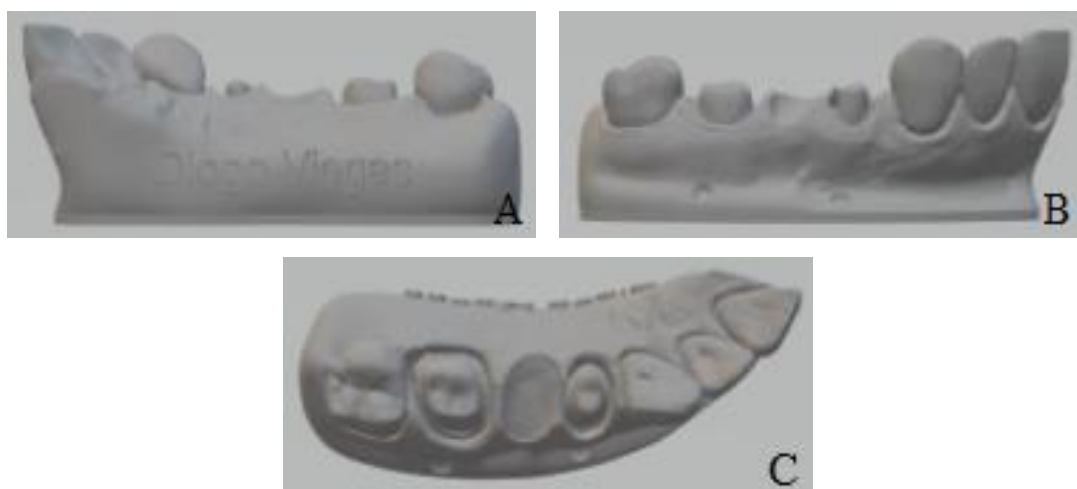
$H_0$  – Não existem diferenças significativas em relação à precisão utilizando o método convencional, de fresagem ou de impressão 3D, para obtenção do modelo de trabalho;

$H_1$  – Existem diferenças significativas em relação à precisão utilizando o método convencional, de fresagem ou de impressão 3D, para obtenção do modelo de trabalho.

### 3. Material e métodos:

#### 3.1. Produção do modelo de referência (MR):

Como referência foi utilizado um modelo de uma hemi-arcada superior direita, representado nas figuras 1, 2 e 3, com ausência do dente 25 e preparo dos dentes 24 e 26 para ponte de 3 elementos. O MR foi fresado em polímero (*Model Blank Bege 95H39, ZirkohnZahn GmbH, Bruneck, Italy*; Lote 8526) e foram obtidos, a partir dele, 72 modelos, divididos em três grupos: 24 modelos convencionais (MC), 24 modelos fresados (MF) e 24 modelos impressos (MI).



Figuras 1-3: MR representado na vista palatina (A), vestibular (B) e oclusal (C).

#### 3.2. Produção dos modelos convencionais (MC) [n=24]:

Os MC foram produzidos a partir de 24 impressões de MR pela técnica de dois tempos, com o material polivinilsiloxano de consistência fluída (*Virtual, Ivoclar Vivadent, Schaan, Lichenstein*; Lote UL2299 / WL2324) e putty (*Virtual, Ivoclar Vivadent, Schaan, Lichenstein*; Lote WL2435), com tempo de polimerização de 4,5 minutos. Para tal, foram elaboradas moldeiras individuais, obtidas a partir de um ficheiro .STL, impressas em resina (*Dental SG Orange Resin, Formlabs Inc, Massachusetts, EUA*; Lote XK221N04), tal como está representado nas figuras 4 e 5. Foi aplicado um adesivo (*VPS Tray Adhesive Refill, 3M ESPE, Minnesota, EUA*; Lote 419032) como forma de aumentar a união entre a moldeira e o material de impressão, minimizando o risco de distorção.





Figura 4 e 5: Representação de uma moldeira individual confeccionada sob o modelo MR, na vista vestibular (A) e palatina (B).

Após 1 hora, que segundo o fabricante é o tempo necessário para a libertação das tensões induzidas e recuperação elástica do material de impressão utilizado, os moldes foram preenchidos com gesso tipo IV (*Fujirock, GC Europe, Leuven, Belgium*; Lote 1803284). Aguardou-se 1 hora para a sua cristalização completa, sendo os modelos separados das impressões por meio de um movimento látero-lateral único. Os modelos de gesso foram armazenados durante 48 horas à temperatura ambiente até à sua análise.

### 3.3. Produção dos modelos fresados (MF) [n=24]:

Foi realizada uma impressão digital de MR com o *scanner Trios 3 (3Shape A/S, Copenhagen, Denmark)*, cuja evidência recente demonstra ser o *scanner* com maior exatidão<sup>(45)</sup>, e foi convertida a informação num ficheiro *.STL*. Os MF foram produzidos a partir de uma fresadora *M4 (ZirkohnZahn GmbH, Bruneck, Italy)*, representada nas figuras 6 e 7, em polímero (*Model Blank Bege 95H24, ZirkohnZahn GmbH, Bruneck, Italy*; Lote 12958) com brocas de desgaste de 2mm, 1mm, 0.5mm e 0.3mm.



Figura 6 e 7: Imagens representativas da fresadora M4 (ZirkohnZahn GmbH, Bruneck, Italy) utilizada neste estudo (Disponíveis em <https://www.zirkonzahn.com/en/cad-cam-systems/milling-unit-m4>. Acesso em Setembro 2020);

#### 3.4. Produção dos modelos impressos (MI) [n=24]:

Para produção dos MI foi utilizado o ficheiro *.STL* anteriormente mencionado, obtido a partir da impressão digital de MR. Os modelos foram elaborados a partir de uma impressora *Form 2* (Formlabs Inc., Massachusetts, EUA), representada na figura 8, que utiliza a tecnologia *SLA* na qual um feixe de laser móvel controlado por computador é pré-programado para reproduzir camadas de resina de 50  $\mu\text{m}$  (resina White V4, Formlabs, Inc., Massachusetts, EUA; Lote RS-F2-GPWH-04) polimerizadas por luz UV (405 nm).



Figura 8: Imagem representativa da impressora *Form 2* (Formlabs Inc., Massachusetts, EUA) utilizada neste estudo. (Disponível em <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/>. Acesso em Setembro 2020).

### 3.5. Análise volumétrica tridimensional:

Como forma de padronizar as medições, todos os modelos reproduzidos foram digitalizados com o auxílio de um *scanner* laboratorial (*S600 Arti, ZirkohnZahn GmbH*) e convertidos sob a forma de ficheiros *.STL*, formato padrão para partilha de dados em CAD/CAM.<sup>(25-27)</sup> A calibração do *scanner* foi realizada aplicando uma placa de calibração padrão e selecionando a opção “*Calibrate Scan*” no *software ZirkohnZahn Scan (ZirkohnZahn GmbH)* de acordo com as recomendações do fabricante.<sup>(45)</sup>

Os ficheiros *.STL* foram convertidos em nuvens de pontos e foram sobrepostos utilizando um *software* de análise 3D (*3D Systems, Rock Hill, Sacramento, USA*), sendo programadas todas as orientações possíveis e selecionada a posição com melhor alinhamento entre objetos (*Best Fit Alignment*), conforme representado na Fig. 9.

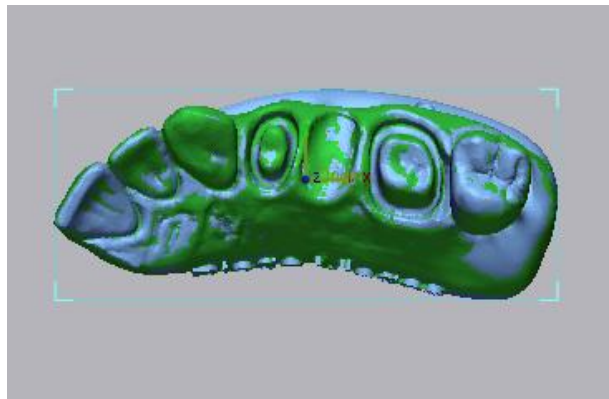


Figura 9: Representação da sobreposição de modelos no *software* de análise 3D (*3D Systems, Rock Hill, Sacramento, USA*) através da função *Best Fit Alignment*.

Para a análise 3D nos eixos x, y e z entre os conjuntos de dados são utilizados algoritmos de máximo ajuste para sobrepor e comparar os modelos. O comando *Best Fit Alignment* é aplicado para que exista exatidão nos resultados obtidos. De seguida, as distâncias entre a superfície do objeto de referência e todos os pontos dos objetos de teste são convertidos em valores de raiz quadrada média (*RMS*) pela fórmula:

$$RMS = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}$$

na qual,  $x_{1,i}$  representa o ponto  $i$  em relação à referência,  $x_{2,i}$  representa o ponto  $i$  em duplicado e  $n$  corresponde ao número total de pontos de medição por amostra.<sup>(31,36,41)</sup>

Os valores quantitativos usados para a análise foram extraídos com base nos valores *RMS*, que representam a raiz quadrada da média das alterações dimensionais.<sup>(31,36)</sup> *RMS* é uma variável utilizada para medir diferenças entre estruturas 3D sobrepostas e é um método reconhecido para avaliar o valor médio dos erros, comparando diretamente dois grupos de dados com um sistema de coordenadas idêntico.<sup>(25-27,31,36,41)</sup> Assim, um valor de *RMS* elevado indica uma grande diferença entre os conjuntos de dados sobrepostos e um valor de *RMS* baixo indica uma elevada semelhança.<sup>(25,31)</sup> Dessa forma, o cálculo da fidelidade e precisão de um grupo de dados correspondente pode ser realizado utilizando uma única escala.<sup>(41)</sup>

A fidelidade foi avaliada pela sobreposição do ficheiro MR com os ficheiros MC, MF e MI, individualmente. A precisão foi avaliada pela sobreposição dos ficheiros entre si, dentro de cada grupo. Na figura 10 está representada a metodologia de sobreposição de modelos utilizada como forma de avaliar a fidelidade e a precisão.

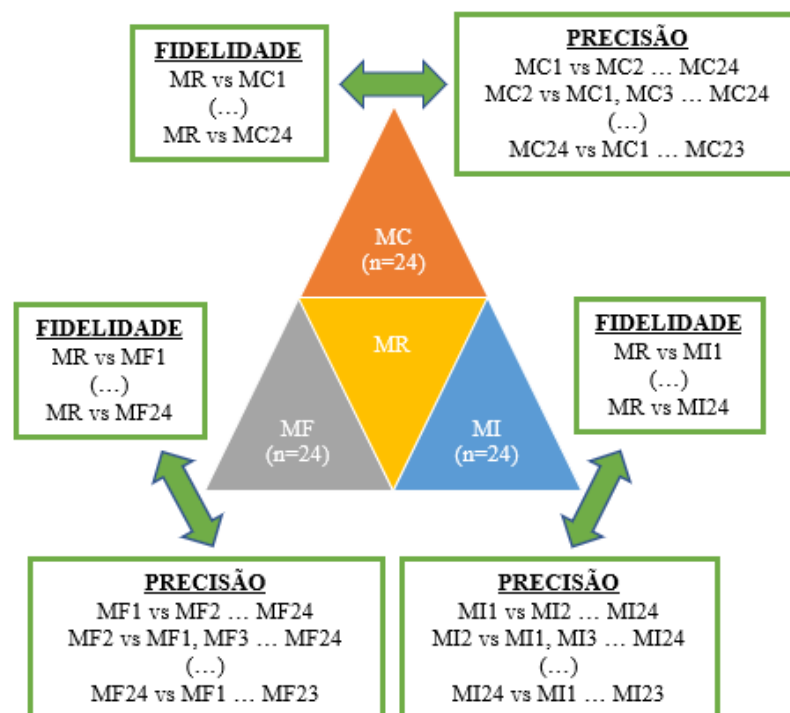


Figura 10: Representação da metodologia de sobreposição de modelos utilizada como forma de avaliar a fidelidade e a precisão.

### 3.6. Análise estatística:

Relativamente ao tamanho da amostra, este foi estimado através de uma análise de poder, sendo esta uma abordagem recorrente em teoria estatística.<sup>(46)</sup> Foi realizado um cálculo *à priori* do tamanho da amostra, representado na figura 11, considerando um tamanho de efeito elevado para o teste *Anova-one-way* ( $f = 0,40$ ).<sup>(47)</sup>

Os cálculos foram realizados utilizando o *software G\*Power*.<sup>(48)</sup> Para um poder mínimo de teste ( $1-\beta$ ) de 0,8 e um nível de significância  $\alpha$  de 0,05, o tamanho mínimo de amostra para a comparação de três grupos seria de 66 observações (22 em cada grupo). Neste estudo, a amostra tem um tamanho de 72 observações (24 em cada grupo).

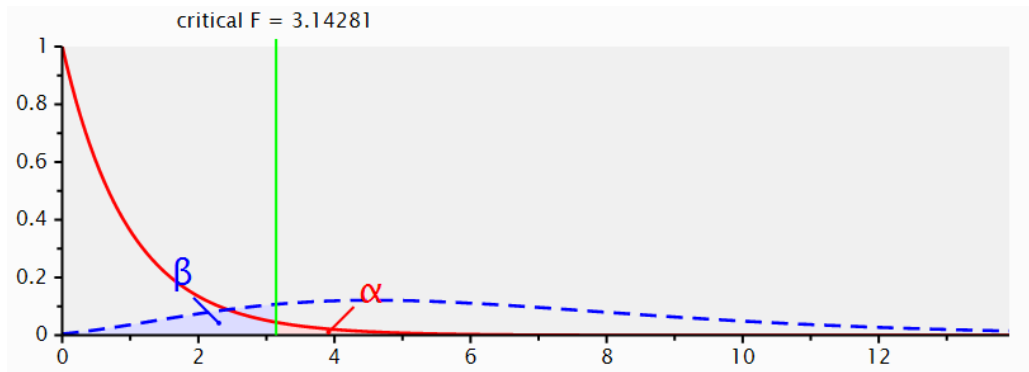


Figura 11: Gráfico representativo do recorte do cálculo *à priori* da dimensão da amostra

Para avaliar a normalidade da distribuição dos resultados foi utilizado o teste de *Shapiro Wilk* e para a comparação entre grupos foi utilizado o teste de *Kruskal-Wallis*, que permitiu identificar a existência de, pelo menos, uma diferença significativa entre as comparações múltiplas dos diferentes grupos. O nível de significância foi definido como  $p < \alpha$ , sendo  $\alpha = 0,05$ .

Para as comparações múltiplas entre grupos, foi utilizado o teste não paramétrico *U de Mann-Whitney*. Foi realizada uma correção de *Bonferroni* em que  $\overline{\alpha}$  tomou o valor de 0,017, portanto o nível de significância deste teste diminuiu e foi definido como sendo  $p < 0,017$ . Foi ainda calculada a dimensão do efeito ( $r$ ), a partir da equação  $r = \frac{z}{\sqrt{(n)}}$ .

O processamento e análise dos dados estatísticos foi realizado através do sistema *IBM SPSS Statistics 23 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)*.

#### 4. Resultados:

Os três grupos foram analisados e comparados em termos de fidelidade e precisão.

##### 4.1. Fidelidade:

A partir da análise dos valores de *RMS* de MC, MF e MI relativamente à fidelidade (apêndice A), podemos observar as diferentes representações da distribuição das variáveis (apêndice B). A estatística descritiva (apêndice C), a avaliação da normalidade e os testes de hipóteses (apêndice D) relativos à fidelidade estão representados na tabela 1.

Tabela 1 - Avaliação do efeito do tipo de processo na fidelidade:

		Variável dependente: Fidelidade		
		Convencional (n=24)	Fresagem (n=24)	Impressão 3D (n=24)
Estatística descritiva	Média	54,10	69,30	139,70
	Desvio padrão	18,05	8,49	17,55
	Erro padrão da média	3,68	1,73	3,58
	Intervalo de confiança (95%)	]46,48 ; 61,72[	]65,71 ; 72,88[	]132,29 ; 147,11[
Avaliação da normalidade (Teste de <i>Shapiro-Wilk</i> )		SW (24) = 0,864 $\rho=0,004$	SW (24) = 0,929 $\rho=0,091$	SW (24) = 0,929 $\rho=0,093$
Decisão		Rejeita-se a hipótese nula de normalidade em pelo menos um dos grupos (grupo I).		
Teste de hipóteses (Teste de <i>Kruskal-Wallis</i> )		$\rho=0,000$ , $\rho<0,001$		
Mean ranks		16,58	32,42	60,50
Decisão		Rejeição da hipótese nula. Existe pelo menos uma comparação entre grupos que é estatisticamente significativa.		

Para testar a normalidade, o teste de *Shapiro-Wilk* indicou que a distribuição de resultados é normal nos grupos MF ( $\rho>\alpha$ ) e MI ( $\rho>\alpha$ ), mas não o é no grupo MC ( $\rho<\alpha$ ). O teste de *Kruskal-Wallis* revelou que existem diferenças significativas entre os três grupos ( $\rho<0,001$ ), sendo MC o grupo que apresentou melhores resultados de fidelidade.

Na comparação intergrupar foi utilizado o teste *U de Mann-Whitney* (apêndice D), sendo os resultados descritos na tabela 2.

Tabela 2 - Avaliação do efeito do tipo de processo na fidelidade: comparações múltiplas:

	Variável dependente: Fidelidade		
	Convencional (n=24) VS Fresagem (n=24)	Convencional (n=24) VS Impressão 3D (n=24)	Fresagem (n=24) VS Impressão 3D (n=24)
Testes de hipóteses de <i>Mann-Whitney</i> : <sup>1</sup>	U = 98,000, $\rho < 0,001$	U = 0,000, $\rho < 0,001$	U = 0,000, $\rho < 0,001$
Decisão	Rejeição da hipótese nula. Existem diferenças estatisticamente significativas		
Mean Ranks	MC = 16,58 MF = 32,42	MC = 12,50 MI = 36,50	MF = 12,50 MI = 36,50
Dimensão do efeito	$r = 0,565$ (A dimensão do efeito é elevada)	$r = 0,857$ (A dimensão do efeito é elevada)	$r = 0,857$ (A dimensão do efeito é elevada)

<sup>1</sup> Foi realizada a correção de *Bonferroni* no valor de significância, sendo que  $\overline{\alpha}$  tomou o valor de 0,017

Verificamos que entre MC e MF existem diferenças significativas, sendo MC que apresentou melhores resultados ( $\rho < \overline{\alpha}$ ). Entre MC e MI existem também diferenças significativas, sendo MC o que apresentou maior fidelidade ( $\rho < \overline{\alpha}$ ). MF e MI também apresentam diferenças significativas entre si, sendo MF o que apresentou melhores resultados ( $\rho < \overline{\alpha}$ ).

Todos os resultados obtidos com significância demonstram ter uma dimensão de efeito elevada ( $r > 0,5$ ).

#### 4.2. Precisão:

A partir da análise dos valores de *RMS* de MC, MF e MI relativamente à precisão (apêndice E), podemos observar as diferentes representações da distribuição das variáveis (apêndice F). A estatística descritiva (apêndice G), a avaliação da normalidade e os testes de hipóteses (apêndice H) relativos à precisão estão representados na tabela 3.

Tabela 3 - Avaliação do efeito do tipo de processo na precisão:

		Variável dependente: Precisão		
		Convencional (n=24)	Fresagem (n=24)	Impressão 3D (n=24)
Estatística descritiva	Média	53,61	24,57	46,02
	Desvio padrão	14,97	2,66	6,36
	Erro padrão da média	3,06	0,54	1,29
	Intervalo de confiança (95%)	]47,29 ; 59,94[	]23,44 ; 25,69[	]43,33 ; 48,71[
Avaliação da normalidade (Teste de <i>Shapiro-Wilk</i> )		SW (24) = 0,873 $\rho=0,006$	SW (24) = 0,884 $\rho=0,010$	SW (24) = 0,904 $\rho=0,026$
Decisão		Rejeita-se a hipótese nula de normalidade em pelo menos um dos grupos (grupo II).		
Teste de hipóteses (Teste de <i>Kruskal-Wallis</i> )		$\rho=0,000$ , $\rho<0,001$		
Mean ranks		52,04	12,5	44,96
Decisão		Rejeição da hipótese nula. Existe pelo menos uma comparação entre grupos que é estatisticamente significativa.		

Os resultados obtidos nos grupos MC ( $\rho<\alpha$ ), MF ( $\rho<\alpha$ ), e MI ( $\rho<\alpha$ ), são inferiores ao nível de significância pelo que a distribuição de resultados não é normal. O teste de *Kruskal-Wallis* revelou que existem diferenças significativas entre os grupos ( $\rho<0,001$ ), sendo MF o que apresentou melhores resultados.

Na comparação intergrupar foi utilizado o teste *U de Mann-Whitney* (apêndice H), sendo os resultados descritos na tabela 4.



Tabela 4 - Avaliação do efeito do tipo de processo na precisão: comparações múltiplas:

	Variável dependente: Fidelidade		
	Convencional (n=24) VS Fresagem (n=24)	Convencional (n=24) VS Impressão 3D (n=24)	Fresagem (n=24) VS Impressão 3D (n=24)
Testes de hipóteses de <i>Mann-Whitney</i> : <sup>1</sup>	U = 0,000, $\rho < 0,001$	U = 203,000, $\rho = 0,080$	U = 0,000, $\rho < 0,001$
Decisão	Rejeição da hipótese nula. Existem diferenças estatisticamente significativas	Retém-se a hipótese nula. Não existem diferenças estatisticamente significativas	Rejeição da hipótese nula. Existem diferenças estatisticamente significativas
<i>Mean Ranks</i>	MC = 36,50 MF = 12,50	MC = 28,04 MI = 20,96	MF = 12,50 MI = 36,50
Dimensão do efeito	$r = 0,857$ (A dimensão do efeito é elevada)	$r = 0,253$ (A dimensão do efeito é baixa)	$r = 0,857$ (A dimensão do efeito é elevada)

<sup>1</sup> Foi realizada a correção de *Bonferroni* no valor de significância, sendo que  $\bar{\alpha}$  tomou o valor de 0,017.

Entre MC e MF existem diferenças significativas, sendo MF o mais preciso ( $\rho < \bar{\alpha}$ ). Entre MC e MI, por outro lado, não existem diferenças significativas ( $\rho > \bar{\alpha}$ ). Entre MF e MI existem diferenças significativas, apresentando MF melhores resultados ( $\rho < \bar{\alpha}$ ).

Apenas a comparação entre os grupos MC e MI apresenta uma dimensão de efeito baixa ( $0,2 \leq r < 0,5$ ).

## 5. Discussão:

Analisámos e discutimos os resultados tendo em consideração as variáveis dependentes e independentes deste estudo, e as suas possíveis combinações:

### 5.1. Variável dependente fidelidade:

A fidelidade representa a proximidade existente entre o valor médio obtido de uma série de resultados de teste em relação a um valor de referência e pode ser influenciada por erros sistemáticos que dependem principalmente das limitações dos instrumentos de trabalho, da técnica utilizada e da experiência do operador.<sup>(23,49)</sup>

Como forma de diminuir a probabilidade de existência de erros que possam influenciar a fidelidade deste estudo, foram tidas em consideração algumas variáveis de controlo, tais como a existência de um único operador que segue um protocolo definido em cada grupo, utilizando sempre os mesmos materiais.<sup>(49)</sup>

Para a fidelidade, o passo crucial de propagação do erro surge durante a aquisição de dados com *scanner*, sendo dependente da tecnologia utilizada.<sup>(6,14)</sup> Os sistemas baseados em vídeo são considerados como sendo mais exatos pelo que, neste estudo, foi utilizado o *scanner Trios 3 (3Shape A/S, Copenhagen, Denmark)*, um sistema de secionamento-ótico ultrarrápido no qual uma fonte de luz promove oscilações na superfície do objeto, sendo a captação de imagens feita de forma contínua.<sup>(9,14,33)</sup> Apresenta uma fidelidade de  $6,9 \pm 0,9 \mu m$ <sup>(50)</sup>, uma precisão de  $4,5 \pm 0,9 \mu m$ <sup>(50)</sup> e uma resolução de 41,21 pontos por  $mm^2$ .<sup>(51)</sup> Assim, foi utilizado o mesmo *scanner* para recolha de informação de todos os grupos digitais numa tentativa de reduzir a possibilidade de influência negativa do tipo de *scanner* nos resultados obtidos.<sup>(50)</sup>

#### 5.1.1. Variável independente técnica convencional e variável dependente fidelidade:

Neste estudo, a técnica convencional demonstrou ter uma fidelidade significativamente maior que as técnicas digitais de fresagem ( $\rho=0,000$ ;  $\rho<\overline{\alpha}$ ;  $r=0,565$ ) e de impressão 3D ( $\rho=0,000$ ;  $\rho<\overline{\alpha}$ ;  $r=0,857$ ). Kim et al.<sup>(24)</sup> validam os resultados obtidos em relação à técnica de fresagem. Outros autores confirmam também os resultados obtidos em relação à técnica de

impressão 3D<sup>(25,26,31,32)</sup> Contrariamente, *Sim et al.*<sup>(27)</sup> e *Choi et al.*<sup>(36)</sup> não apresentaram resultados significativos na comparação entre técnicas.

No grupo convencional foi utilizado elastômero como material de impressão, sendo considerado o *standard* para diagnóstico e plano de tratamento ainda nos dias de hoje.<sup>(33,36)</sup> Este tipo de materiais apresentam melhores resultados de reprodução de detalhe e estabilidade dimensional, contudo são vulneráveis ao risco de perda, destruição e deterioração.<sup>(1,3,10,52)</sup> Relativamente à confecção do modelo, foi utilizado gesso tipo IV, apresentando baixa expansão de presa e elevada resistência à fratura, sendo adequado para produção de modelos de trabalho em Prótese Fixa.<sup>(52)</sup> Dessa forma, o tipo de materiais utilizados neste estudo enaltece os resultados já conhecidos.

Sabemos que a cada etapa do processo de reprodução dos modelos convencionais aumenta o risco de erro humano associado, principalmente pelo facto de esta ser uma técnica que envolve uma maior manipulação por parte do operador e de ser dependente da sua experiência.<sup>(5-8)</sup> Para contrariar a sua influência nos resultados foi necessária uma correta e atenta manipulação dos materiais segundo as regras do fabricante.<sup>(7,53)</sup>

#### 5.1.2. Variável independente técnica de fresagem e variável dependente fidelidade:

Segundo os resultados obtidos, apesar de apresentarem resultados inferiores à técnica convencional, a técnica de fresagem, demonstrou ser mais fidedigna que a técnica de impressão 3D ( $\rho=0,000$ ;  $\rho<\overline{\alpha}$ ;  $r=0,857$ ), sendo essa diferença estatisticamente significativa. Segundo a literatura, *Yau et al.*<sup>(34)</sup> corroboram os resultados obtidos, contudo o mesmo não acontece nos estudos de *Patzelt et al.*<sup>(33)</sup> e *Jeong et al.*<sup>(35)</sup>. Tal contradição também pode ser observada em estudos comparativos relativamente à adaptação de peças protéticas<sup>(37-44)</sup>, contudo, em *inlays* que são peças pequenas e com elevado detalhe foi a fresagem que apresentou melhores resultados.<sup>(40)</sup>

O processo de reprodução de modelos pela técnica digital envolve tecnologia que possibilita também, a cada etapa, a existência de erros que aumentam a probabilidade de distorções do modelo final.<sup>(1-4,11-13)</sup>

No caso da técnica de fresagem, a forma, espessura e tamanho das brocas, e a capacidade que a máquina apresenta de rodar um objeto, estão diretamente relacionadas com a fidelidade da forma geométrica apresentada.<sup>(15,16)</sup> Neste estudo foi utilizada uma fresadora de 5+1 eixos, na qual para além da rotação associada ao bloco/disco existe também rotação na haste, pelo que apresenta uma maior exatidão.<sup>(3,15)</sup>

### 5.1.3. Variável independente técnica de fresagem e variável dependente fidelidade:

Relativamente à técnica de impressão 3D, foi utilizada uma impressora de *SLA* que permite a polimerização de camadas de material de espessura uniforme utilizando um feixe laser UV.<sup>(17,18,19)</sup> *Al-Imam et al.*<sup>(26)</sup> verificou que a fidelidade dos modelos impressos está diretamente relacionada com o sistema utilizado, sendo que existiram diferenças significativas entre modelos fabricados por impressoras diferentes, mas tal não se verificou ao nível da precisão. Segundo Carmadella et al.<sup>(30)</sup> as alterações dimensionais em relação ao modelo de referência devem-se principalmente à contração de polimerização associada. *Keating et al.*<sup>(28)</sup> confirmaram que essas alterações são maiores no plano Z do espaço. Assim, podemos induzir que a fidelidade deste grupo depende principalmente da espessura pré-determinada.<sup>(20,27-29)</sup> Segundo *Chockalingan et al.*<sup>(22)</sup>, uma espessura máxima de  $125\mu m$  está relacionada com um menor *stress* residual causado pela contração de polimerização associada (alterações podem variar entre 6 a 10%). Neste estudo, os modelos impressos foram construídos num sistema em camadas de  $50\mu m$  de espessura.

Para além da espessura, também a resina acrílica utilizada, o seu grau de conversão, a dimensão do laser, a sua intensidade e os procedimentos finais de tratamento de superfície recomendados pelo fabricante têm influência na cascata de erros que pode estar associada à reprodução de objetos a partir de *SLA*.<sup>(8,20-22)</sup> Os procedimentos de finalização recomendados pelo fabricante, neste caso envolveram luz UV e calor como forma de solidificar partículas de monómero residual, melhorando as propriedades mecânicas do objeto. Este processo pode ter potenciado a contração existente e a deformação.<sup>(28)</sup>

## 5.2. Variável dependente precisão:

A precisão fornece informações sobre o grau de concordância dos valores de medição individuais de um conjunto de dados. É, portanto, independente do valor de referência, pelo que um grupo pode ter um elevado grau de precisão por apresentar elementos com valores semelhantes entre si, mas pode ser pouco fidedigno pelas diferenças em relação ao valor ideal. Assim, a precisão depende da presença de erros aleatórios ou acidentais, influenciados pelas condições externas de repetibilidade e reprodutibilidade.<sup>(23,49)</sup>

Para diminuir a probabilidade de existência deste tipo de erros, foram tidas em consideração algumas variáveis de controlo em todos os grupos, nomeadamente a aquisição de dados que foi realizada de forma extra oral, prevenindo a existência de distorções causadas pelo meio, tais como a influência negativa dos movimentos do paciente e a presença de fluidos como sangue ou saliva.<sup>(5,7,8,33)</sup> O *scanner* laboratorial utilizado (*S600 Arti, ZirkohnZahn GmbH*) apresenta uma precisão  $\leq 10 \mu\text{m}$ <sup>(54)</sup> e tendo em conta que foi utilizado o mesmo *scanner* para tratamento dos dados de todos os grupos excluímos a possibilidade da sua influência negativa nos resultados obtidos.

### 5.2.1. Variável independente técnica de fresagem e variável dependente precisão:

Neste estudo, a técnica de fresagem demonstrou ser significativamente mais precisa que as técnicas convencionais ( $\rho=0,000$ ;  $\rho<\overline{\alpha}$ ;  $r=0,857$ ) e de impressão 3D ( $\rho=0,000$ ;  $\rho<\overline{\alpha}$ ;  $r=0,857$ ). Segundo a literatura, existem estudos que defendem que a técnica de fresagem apresenta piores resultados de precisão que a técnica de impressão 3D.<sup>(33,35)</sup> *Yau et al.*<sup>(34)</sup> obtiveram resultados contraditórios e quando comparada com todas as técnicas, foi a fresagem que apresentou melhor precisão, o que corrobora os nossos resultados.<sup>(36)</sup>

*Patzelt et al.*<sup>(33)</sup> tal como referido anteriormente, obtiveram resultados divergentes, contudo, se tivermos em conta a sua metodologia, verificamos que em cada grupo foi utilizado um *scanner* diferente como forma de determinar a sua influência. Ao grupo de fresagem foi associado um *scanner* que em estudos anteriores tinha demonstrado ter menor exatidão, o que pode ter afetado negativamente os resultados.<sup>(14)</sup>

*Jeong et al.*<sup>(35)</sup> contrariam também os resultados obtidos, no entanto, para a confecção de modelos fresados foi utilizada uma broca com  $100\mu m$  de espessura e, dessa forma, o detalhe de reprodução foi inferior. Para além disso, foram reproduzidos dois modelos por bloco como forma de diminuir a fadiga, o que pode ter contribuído para diminuir o rigor associado à reprodução dos modelos fresados.<sup>(35)</sup>

A técnica de fresagem envolve erros que podem ser causados pela contração ou expansão física dos instrumentos de desgaste, pela sua vibração excessiva ou pela sua flexão devido às forças de desgaste exercidas, perdendo eficácia a cada utilização.<sup>(15,16)</sup> No entanto, o rigor e qualidade de superfície tendem a ser melhores devido à forma como são fabricados e aos procedimentos finais de acabamento recomendados pelos fabricantes.<sup>(34)</sup>

#### 5.2.2. Variável independente técnica convencional e variável dependente precisão:

Neste estudo, apesar de apresentarem resultados inferiores à técnica de fresagem, a técnica convencional e a técnica de impressão 3D não apresentaram diferenças significativas ao nível da precisão ( $p=0,080$ ;  $p>\alpha$ ;  $r=0,253$ ). Segundo a literatura, existem estudos que corroboram os resultados obtidos<sup>(28-30)</sup>, contudo existem autores que defendem que a técnica convencional apresenta melhores resultados de precisão que a técnica de impressão 3D.<sup>(25-27)</sup> *Jin et al.*<sup>(31)</sup> obtiveram resultados contraditórios.

Para garantir precisão e uma adequada estabilidade dimensional a longo prazo nos modelos de trabalho reproduzidos pela técnica convencional, é necessário ter em conta a adequada e estável temperatura do meio ambiente, a correta desinfecção do molde, o acondicionamento dos materiais e o tempo que decorre entre fases.<sup>(52,53)</sup> O desrespeito de alguma destas condições pode ser justificação para a existência de um valor extremo nos dados deste grupo, e poderia ter influenciado os resultados obtidos, contudo verificámos que a sua exclusão não afetaria os resultados estatísticos.

#### 5.2.3. Variável independente técnica de impressão 3D e variável dependente precisão:

Relativamente à técnica de impressão 3D, *Jin et al.*<sup>(31)</sup> demonstraram resultados de precisão superiores, sendo que a técnica *polyjet* demonstrou melhores resultados que a técnica

de *SLA*, confirmado também por *Park et al.*<sup>(32)</sup> Dessa forma, podemos inferir que a metodologia de impressão pode ter influenciado os resultados obtidos. Estes objetos são também mais sensíveis à luz, à temperatura e à presença de oxigénio pelo que o seu acondicionamento pode ter sido também importante.<sup>(17,30)</sup>

Este estudo apresenta como fator positivo o facto de ter uma amostra relativamente elevada. Nos estudos semelhantes encontrados na literatura esse número é menor, o que enaltece os resultados obtidos e reforça a sua aplicabilidade clínica.<sup>(33-44)</sup> A análise dos modelos foi realizada através de um *software* como forma de reduzir o erro associado às medições lineares inerentes à sobreposição de pontos, sendo assim utilizado um maior número de marcadores de referência e diminuído o risco de viés.<sup>(31,36)</sup>

Por outro lado, apresenta como limitações o facto de ser utilizado um modelo de trabalho artificial como forma de simular as estruturas orais humanas, o que, apesar de eliminar o risco de distorções associadas ao ambiente oral, não torna possível obter valores exatamente reais aos encontrados na prática clínica. O facto de utilizarmos modelos de um quadrante é também uma limitação tendo em conta que difere das condições ideais, uma vez que o processo de elaboração de um modelo de trabalho envolve idealmente a impressão da arcada completa. Também as diferenças encontradas na metodologia utilizada pelos diferentes estudos existentes na literatura dificultam a sua comparação.<sup>(5)</sup>

Tendo em conta os resultados obtidos pela técnica convencional, não podemos dizer que este seja um estudo de disrupção entre a Medicina Dentária clássica e a nova era digital. Apesar das vantagens que apresentam as técnicas digitais na prática clínica, o elevado custo do equipamento associado a uma menor fidelidade, podem pôr em causa a sua real aplicabilidade. Contudo, é importante salientar que a fidelidade e a precisão influenciam de igual forma a exatidão de reprodução dos modelos<sup>(49)</sup>, o que enaltece os resultados obtidos pela técnica digital de fresagem ao nível da precisão.

Em Prótese Fixa, é tido como valor de referência uma exatidão máxima de  $70\mu\text{m}$  para que exista uma boa adaptação entre a peça protética e o modelo de trabalho e um valor máximo de  $200\mu\text{m}$  entre o modelo de trabalho e o original.<sup>(28,31,34)</sup> Tendo em conta os valores de *RMS* obtidos, podemos afirmar que os modelos reproduzidos no nosso estudo, tanto convencionais como digitais, têm uma excelente aplicabilidade clínica em Prostodontia Fixa.

Considerando as limitações deste estudo, realçamos a importância de aprofundar esta investigação, sendo interessante aplicar a mesma metodologia em ambiente clínico como forma de avaliar a coerência dos resultados obtidos, permitindo que o elevado desenvolvimento tecnológico seja cientificamente sustentado, numa tentativa de promover a modernização da prática clínica nesta era cada vez mais digital.

Este trabalho de investigação foi submetido como artigo à revista científica *Brazilian Dental Science* no dia 20 de Março. Tendo sido aceite, encontra-se em fase de preparação para publicação (apêndices I e J).



## **6. Conclusão:**

Com este estudo, podemos concluir que:

- I. Existem diferenças significativas em relação à fidelidade utilizando o método convencional, de fresagem ou de impressão 3D, para obtenção do modelo de trabalho. A técnica convencional foi a que apresentou melhores resultados em relação a todos os grupos, sendo que, de entre as técnicas digitais, a técnica de fresagem demonstrou ser superior à técnica de impressão 3D;
- II. Existem diferenças significativas em relação à precisão utilizando o método convencional, de fresagem ou de impressão 3D, para obtenção do modelo de trabalho. A técnica de fresagem foi a que apresentou melhores resultados em relação a todos os grupos, sendo que as técnicas convencional e digital de impressão 3D demonstraram ser semelhantes.

Assim, tendo em consideração as limitações deste estudo podemos afirmar que, para reprodução de modelos de trabalho, a técnica convencional é a que apresenta maior fidelidade e a técnica de fresagem a que apresenta maior precisão.

## 7. Bibliografia:

1. van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dent Mater.* 2012;28(1):3-12. doi:10.1016/j.dental.2011.10.014.
2. Baroudi K, Ibraheem SN. Assessment of chair-side computer-aided design and computer-aided manufacturing restorations: a review of the literature. *J Int Oral Health.* 2015;7(4):96-104.
3. Alghazzawi TF. Advancements in CAD/CAM technology: options for practical implementation. *J Prosthodont Res.* 2016;60(2):72-84. doi:10.1016/j.jpor.2016.01.003.
4. Revilla-León M, Özcan M. Additive manufacturing technologies used for processing polymers: current status and potential application in prosthetic dentistry. *J Prosthodont.* 2019;28(2):146-158. doi:10.1111/jopr.12801.
5. Joda T, Zarone F, Ferrari M. The complete digital workflow in fixed prosthodontics: a systematic review. *BMC Oral Health.* 2017;17(1):124. doi:10.1186/s12903-017-0415-0.
6. Logozzo S, Franceschini G, Kilpela A, Caponi M, Governi L, Blois L. A comparative analysis of intraoral 3D digital scanners for restorative dentistry. *J Med Technol* 2008;5:1-18. doi:10.5580/1b90.
7. Yuzbasioglu E, Kurt H, Turunc R, Bilir H. Comparison of digital and conventional impression techniques: evaluation of patients' perception, treatment comfort, effectiveness and clinical outcomes. *BMC Oral Health.* 2014;14:10. doi:10.1186/1472-6831-14-10.
8. Sawase T, Kuroshima S. The current clinical relevancy of intraoral scanners in implant dentistry. *Dent Mater J.* 2020;39(1):57-61. doi:10.4012/dmj.2019-285.
9. Logozzo S, Zanetti EM, Franceschini G, Kilpelä A, Mäkynen A. Recent advances in dental optics – Part I: 3D intraoral scanners for restorative dentistry. *Opt Lasers Eng* 2014;54:203-21. doi:10.1016/j.optlaseng.2013.07.017.
10. Patzelt SB, Lamprinos C, Stampf S, Att W. The time efficiency of intraoral scanners: an in vitro comparative study. *J Am Dent Assoc.* 2014;145(6):542-51. doi:10.14219/jada.2014.23.

11. Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *Br Dent J*. 2008;204(9):505-11. doi:10.1038/sj.bdj.2008.350.
12. Petrovic V, Gonzalez JVH, Ferrando OJ, Gordillo JD, Puchades JRB, Griñan LP. Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies. *Int J Prod Res* 2011;49:1061-79. doi:10.1080/00207540903479786.
13. Koch GK, Gallucci GO, Lee SJ. Accuracy in the digital workflow: From data acquisition to the digitally milled cast. *J Prosthet Dent*. 2016;115(6):749-54. doi:10.1016/j.prosdent.2015.12.004.
14. Patzelt SB, Emmanouilidi A, Stampf S, Strub JR, Att W. Accuracy of full-arch scans using intraoral scanners. *Clin Oral Investig*. 2014;18(6):1687-94. doi:10.1007/s00784-013-1132-y.
15. Bosch G, Ender A, Mehl A. A 3-dimensional accuracy analysis of chairside CAD/CAM milling processes. *J Prosthet Dent*. 2014;112(6):1425-31. doi: 10.1016/j.prosdent.2014.05.012.
16. Schmitz TL, Ziegert JC, Canning JS, Zapata R. Case study: a comparison of error sources in high-speed milling. *Precis Eng* 2008;32:126-33. doi:10.1016/j.precisioneng.2007.06.001.
17. Berman B. 3-D printing: the new industrial revolution. *Bus Horiz* 2012;55:155-62. doi:10.1016/j.bushor.2011.11.003.
18. Javaid M, Haleem A. Current status and applications of additive manufacturing in dentistry: a literature-based review. *J Oral Biol Craniofac Res* 2019;9:179-85. doi:10.1016/j.jobcr.2019.04.004.
19. Braian M, Jimbo R, Wennerberg A. Production tolerance of additive manufactured polymeric objects for clinical applications. *Dent Mater*. 2016;32(7):853-61. doi:10.1016/j.dental.2016.03.020.
20. Loflin WA, English JD, Borders C, Harris LM, Moon A, Holland JN, Kasper FK. Effect of print layer height on the assessment of 3D-printed models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2019;156(2):283-289. doi:10.1016/j.ajodo.2019.02.013.

21. Zhang ZC, Li PL, Chu FT, Shen G. Influence of the three-dimensional printing technique and printing layer thickness on model accuracy. *J Orofac Orthop*. 2019;80(4):194-204. doi:10.1007/s00056-019-00180-y.
22. Chockalingam K, Jawahar N, Chandrasekhar U. Influence of layer thickness on mechanical properties in stereolithography. *Rapid Prototyp J* 2006;12:106-13. doi:10.1108/13552540610652456.
23. International Organization for Standardization. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 1: General principles and definitions. 1st ed. ISO 5725-1. 1994.
24. Kim SY, Lee SH, Cho SK, Jeong CM, Jeon YC, Yun MJ, Huh JB. Comparison of the accuracy of digitally fabricated polyurethane model and conventional gypsum model. *J Adv Prosthodont*. 2014;6(1):1-7. doi:10.4047/jap.2014.6.1.1.
25. Cho SH, Schaefer O, Thompson GA, Guentsch A. Comparison of accuracy and reproducibility of casts made by digital and conventional methods. *J Prosthet Dent*. 2015 Apr;113(4):310-5. doi:10.1016/j.prosdent.2014.09.027.
26. Al-Imam H, Gram M, Benetti AR, Gotfredsen K. Accuracy of stereolithography additive casts used in a digital workflow. *J Prosthet Dent*. 2018;119(4):580-585. doi:10.1016/j.prosdent.2017.05.020.
27. Sim JY, Jang Y, Kim WC, Kim HY, Lee DH, Kim JH. Comparing the accuracy (trueness and precision) of models of fixed dental prostheses fabricated by digital and conventional workflows. *J Prosthodont Res*. 2019;63(1):25-30. doi:10.1016/j.jpor.2018.02.002.
28. Keating AP, Knox J, Bibb R, Zhurov AI. A comparison of plaster, digital and reconstructed study model accuracy. *J Orthod*. 2008;35(3):191-201. doi:10.1179/146531207225022626.
29. Kasparova M, Grafova L, Dvorak P, Dostalova T, Prochazka A, Eliasova H, Prusa J, Kakawand S. Possibility of reconstruction of dental plaster cast from 3D digital study models. *Biomed Eng Online*. 2013;12:49. doi:10.1186/1475-925X-12-49.

30. Camardella LT, Vilella OV, van Hezel MM, Breuning KH. Accuracy of stereolithographically printed digital models compared to plaster models. *J Orofac Orthop.* 2017;78(5):394-402. doi:10.1007/s00056-017-0093-1.
31. Jin SJ, Kim DY, Kim JH, Kim WC. Accuracy of dental replica models using photopolymer materials in additive manufacturing: in vitro three-dimensional evaluation. *J Prosthodont.* 2019;28(2):557-562. doi:10.1111/jopr.12928.
32. Park ME, Shin SY. Three-dimensional comparative study on the accuracy and reproducibility of dental casts fabricated by 3D printers. *J Prosthet Dent.* 2018;119(5):861. doi:10.1016/j.prosdent.2017.08.020.
33. Patzelt SB, Bishti S, Stampf S, Att W. Accuracy of computer-aided design/computer-aided manufacturing-generated dental casts based on intraoral scanner data. *J Am Dent Assoc.* 2014;145(11):1133-40. doi:10.14219/jada.2014.87.
34. Yau HT, Yang T, Lin Y. Comparison of 3-D printing and 5-axis milling for the production of dental e-models from intra-oral scanning. *Comput Aided Des Appl* 2016;13(1):32-8. doi:10.1080/16864360.2015.1059186.
35. Jeong YG, Lee WS, Lee KB. Accuracy evaluation of dental models manufactured by CAD/CAM milling method and 3D printing method. *J Adv Prosthodont.* 2018;10(3):245-251. doi:10.4047/jap.2018.10.3.245.
36. Choi JW, Ahn JJ, Son K, Huh JB. Three-dimensional evaluation on accuracy of conventional and milled gypsum models and 3D printed photopolymer models. *Materials.* 2019;12(21):3499. doi:10.3390/ma12213499.
37. Alharbi N, Alharbi S, Cuijpers VMJI, Osman RB, Wismeijer D. Three-dimensional evaluation of marginal and internal fit of 3D-printed interim restorations fabricated on different finish line designs. *J Prosthodont Res.* 2018;62(2):218-226. doi:10.1016/j.jpor.2017.09.002.
38. Mai HN, Lee KB, Lee DH. Fit of interim crowns fabricated using photopolymer-jetting 3D printing. *J Prosthet Dent.* 2017;118(2):208-215. doi:10.1016/j.prosdent.2016.10.030.
39. Lee WS, Lee DH, Lee KB. Evaluation of internal fit of interim crown fabricated with CAD/CAM milling and 3D printing system. *J Adv Prosthodont.* 2017;9(4):265-270. doi:10.4047/jap.2017.9.4.265.

40. Homsy FR, Özcan M, Khoury M, Majzoub ZAK. Marginal and internal fit of pressed lithium disilicate inlays fabricated with milling, 3D printing, and conventional technologies. *J Prosthet Dent*. 2018;119(5):783-790. doi:10.1016/j.prosdent.2017.07.025.
41. Jang Y, Sim JY, Park JK, Kim WC, Kim HY, Kim JH. Accuracy of 3-unit fixed dental prostheses fabricated on 3D-printed casts. *J Prosthet Dent* 2020;123:135-42. doi:10.1016/j.prosdent.2018.11.004.
42. Pompa G, Di Carlo S, De Angelis F, Cristalli MP, Annibali S. Comparison of conventional methods and laser-assisted rapid prototyping for manufacturing fixed dental prostheses: an in vitro study. *Biomed Res Int*. 2015;318097. doi:10.1155/2015/318097.
43. Khaledi AA, Farzin M, Akhlaghian M, Pardis S, Mir N. Evaluation of the marginal fit of metal copings fabricated by using 3 different CAD-CAM techniques: milling, stereolithography, and 3D wax printer. *J Prosthet Dent*. 2020;124(1):81-86. doi:10.1016/j.prosdent.2019.09.002.
44. Presotto AGC, Barão VAR, Bhering CLB, Mesquita MF. Dimensional precision of implant-supported frameworks fabricated by 3D printing. *J Prosthet Dent*. 2019;122(1):38-45. doi:10.1016/j.prosdent.2019.01.019.
45. Viegas DC, Mourão JT, Roque JC, Riquieri H, Fernandes J, Arrobas F, Diamantino P, Saavedra G. Evaluation of the influence of the impression technique, scanning direction and type of scanner on the accuracy of the final model. *Braz Dent Sci*, 2021;24(1). doi: 10.14295/bds.2021.v24i1.2179.
46. Hair JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE, Tatham RL. *Multivariate Data Analysis*. 7th ed. Edinburgh: Pearson New Internacional Edition; 2005.
47. Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioural sciences*. 2nd ed. New York: Academic Press; 1988.
48. Erdfelder E, Faul F, Buchner A, Lang AG. Statistical power analyses using G\*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*. 2009;41(4):1149–1160. doi:10.3758/BRM.41.4.1149.
49. Menditto A, Patriarca M, Magnusson B. Understanding the meaning of accuracy, trueness and precision. *Accredit Qual Assur* 2007;12(1):45-7. doi:10.1007/s00769-006-0191-z.

50. 3Shape A/S. Trios 3. Copenhagen, Denmark. [Cited 2020 October 10] Available from: <https://www.3shape.com/en/scanners/trios-3>.
51. Medina-Sotomayor P, Pascual-Moscardó A, Camps I. Relationship between resolution and accuracy of four intraoral scanners in complete-arch impressions. *J Clin Exp Dent*. 2018;10(4):361-366. doi:10.4317/jced.54670.
52. Anusavice K. Phillips' science of dental materials. 11th ed. St. Louis, Missouri: Elsevier; 2003. p. 223-30.
53. Anusavice K. Phillips' science of dental materials. 11th ed. St. Louis, Missouri: Elsevier; 2003. p. 273-6.
54. Scanner S600 Arti. Zirkonzahn. Copenhagen, Italy. [Cited 2021 May 30] Available from: <https://zirkonzahn.com/pt/sistemas-cad-cam/scanner-s600-arti>.





## **APÊNDICE A – VALORES DE *RMS* PARA A FIDELIDADE**



**Tabela 1** – Dados de *RMS* para a fidelidade (técnica convencional):

	MR
MC1	0,0479
MC2	0,0513
MC3	0,0332
MC4	0,109
MC5	0,0571
MC6	0,0408
MC7	0,0403
MC8	0,0827
MC9	0,0385
MC10	0,0459
MC11	0,0373
MC12	0,0534
MC13	0,0402
MC14	0,0852
MC15	0,069
MC16	0,0586
MC17	0,0471
MC18	0,0422
MC19	0,0662
MC20	0,0611
MC21	0,0573
MC22	0,044
MC23	0,0536
MC24	0,0366
$\bar{X}$	0,054104167

**Tabela 2** – Dados de *RMS* para a fidelidade (técnica de fresagem):

	MR
MF1	0,0793
MF2	0,0774
MF3	0,0853
MF4	0,0765
MF5	0,086
MF6	0,0831
MF7	0,0762
MF8	0,0738
MF9	0,0653
MF10	0,0621
MF11	0,0639
MF12	0,0656
MF13	0,0678
MF14	0,0604
MF15	0,0661
MF16	0,0701
MF17	0,0699
MF18	0,0575
MF19	0,0672
MF20	0,0636
MF21	0,0654
MF22	0,0581
MF23	0,0612
MF24	0,0614
$\bar{X}$	0,0693

**Tabela 3** – Dados de *RMS* para a fidelidade (técnica de impressão 3D):

	MR
MI1	0,1289
MI2	0,1344
MI3	0,1717
MI4	0,1144
MI5	0,1486
MI6	0,1221
MI7	0,1187
MI8	0,1219
MI9	0,1491
MI10	0,149
MI11	0,1635
MI12	0,1368
MI13	0,1375
MI14	0,1373
MI15	0,1461
MI16	0,1491
MI17	0,1466
MI18	0,1188
MI19	0,1184
MI20	0,1326
MI21	0,1714
MI22	0,1208
MI23	0,1463
MI24	0,1687
$\bar{X}$	0,139695833

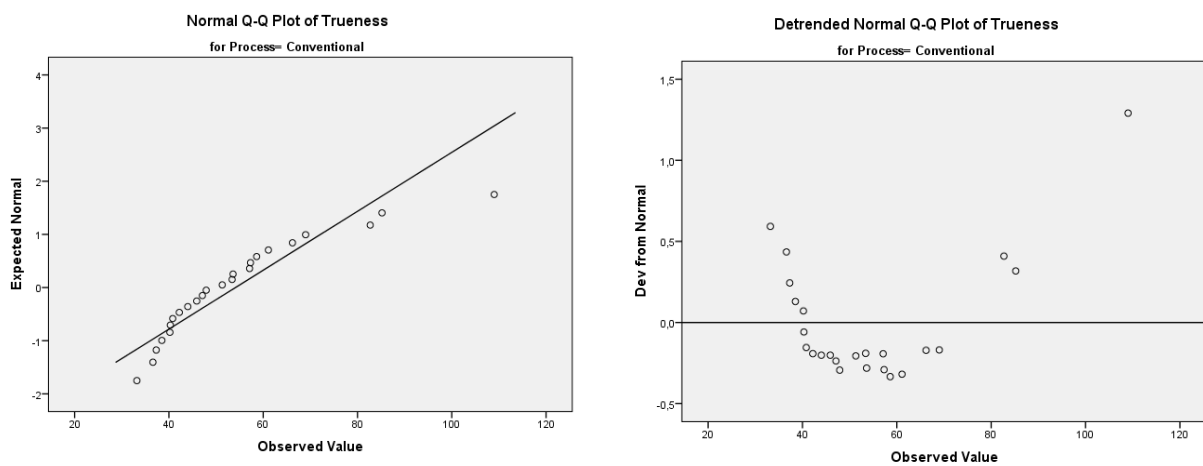


# **ANEXO B – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES NA FIDELIDADE**

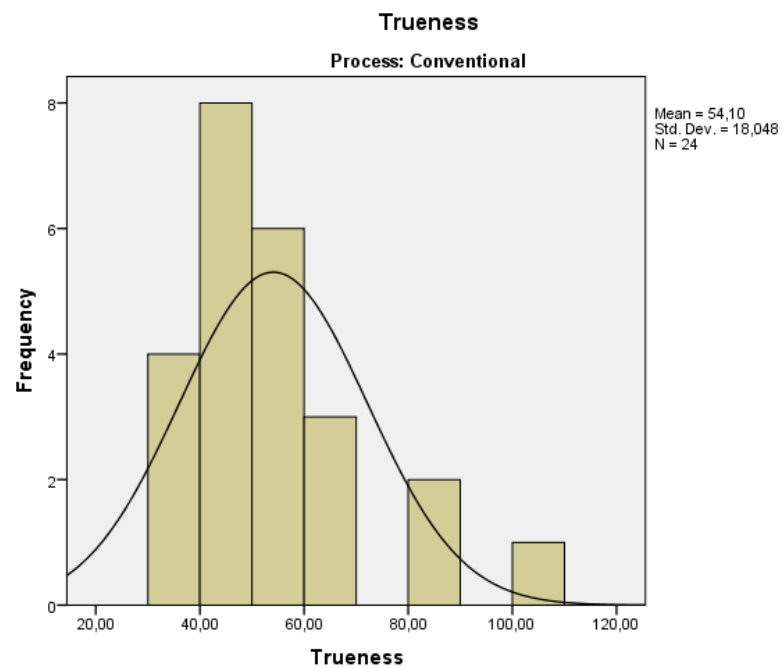
**(GRÁFICOS *Q-Q PLOT*, HISTORAMAS E *BOXPLOTS*)**



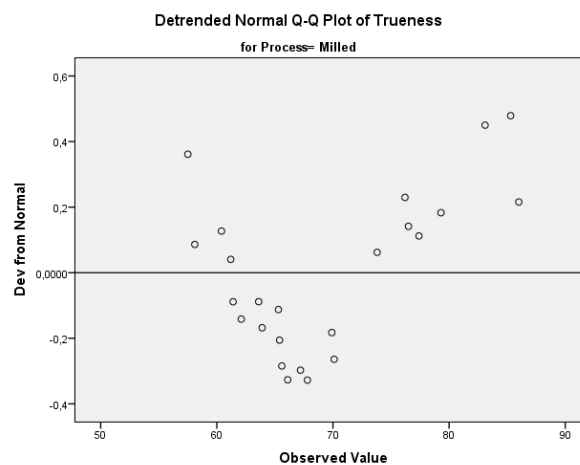
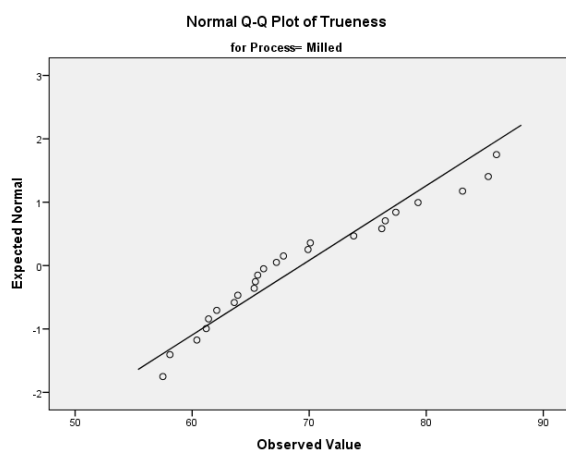




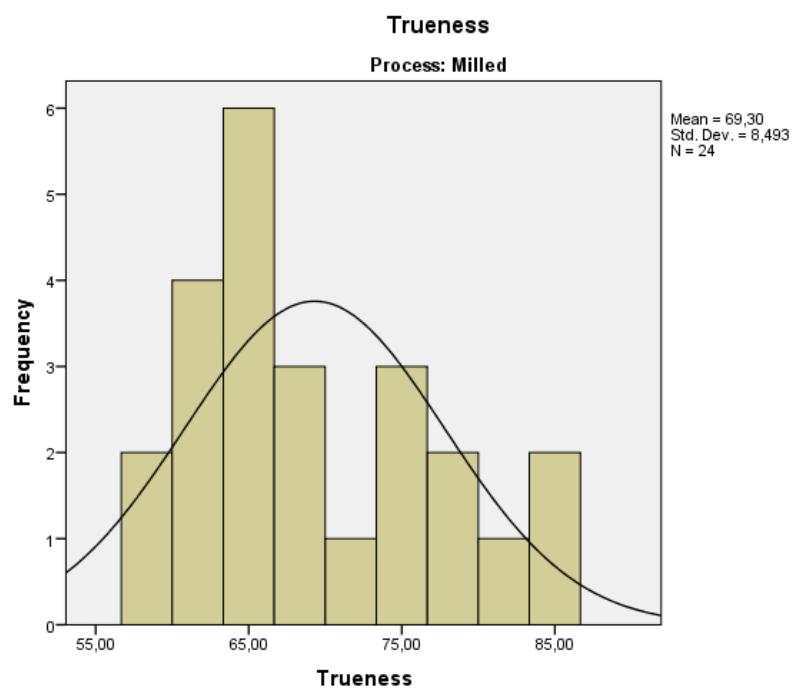
**Figuras 1 e 2:** Gráficos *Q-Q plot* da fidelidade (técnica convencional).



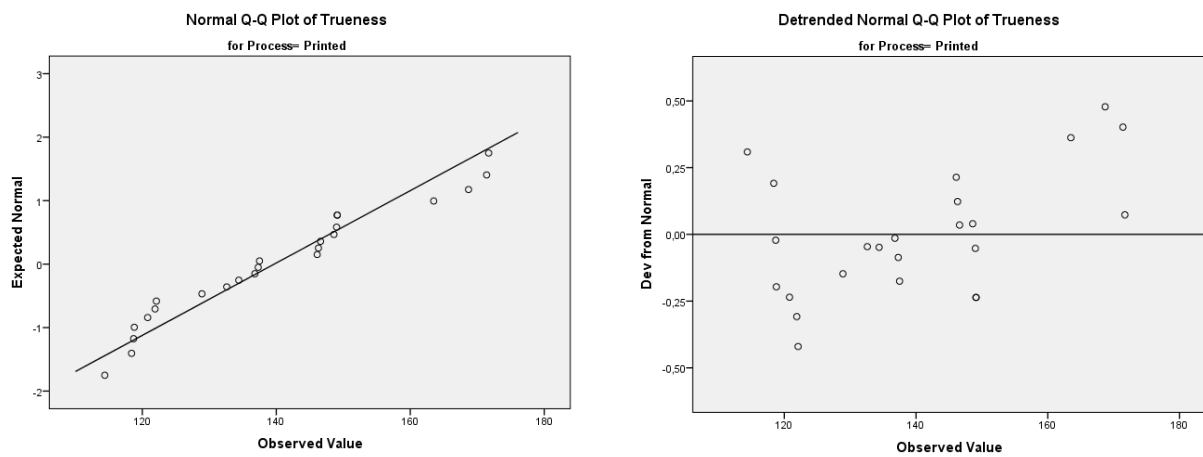
**Figura 3:** Histograma da fidelidade (técnica convencional).



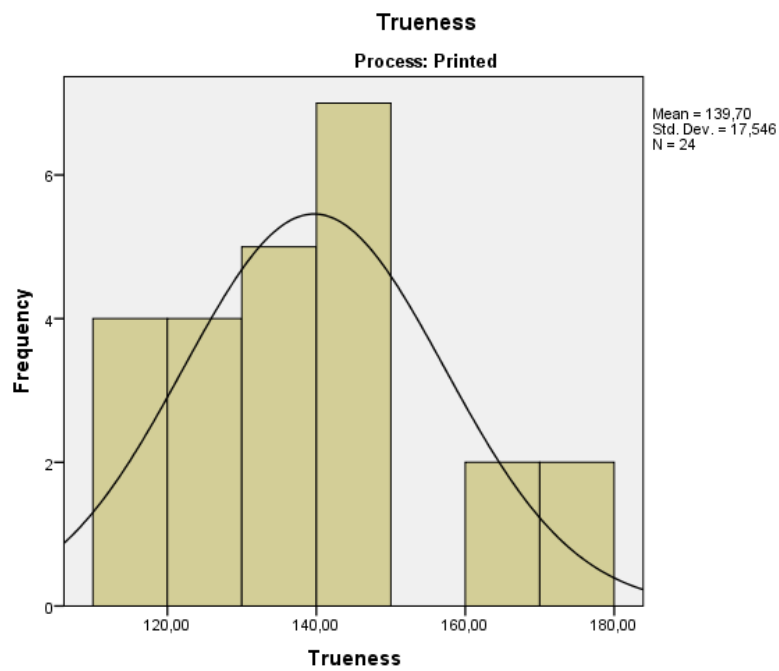
**Figuras 4 e 5:** Gráficos *Q-Q plot* da fidelidade (técnica de fresagem).



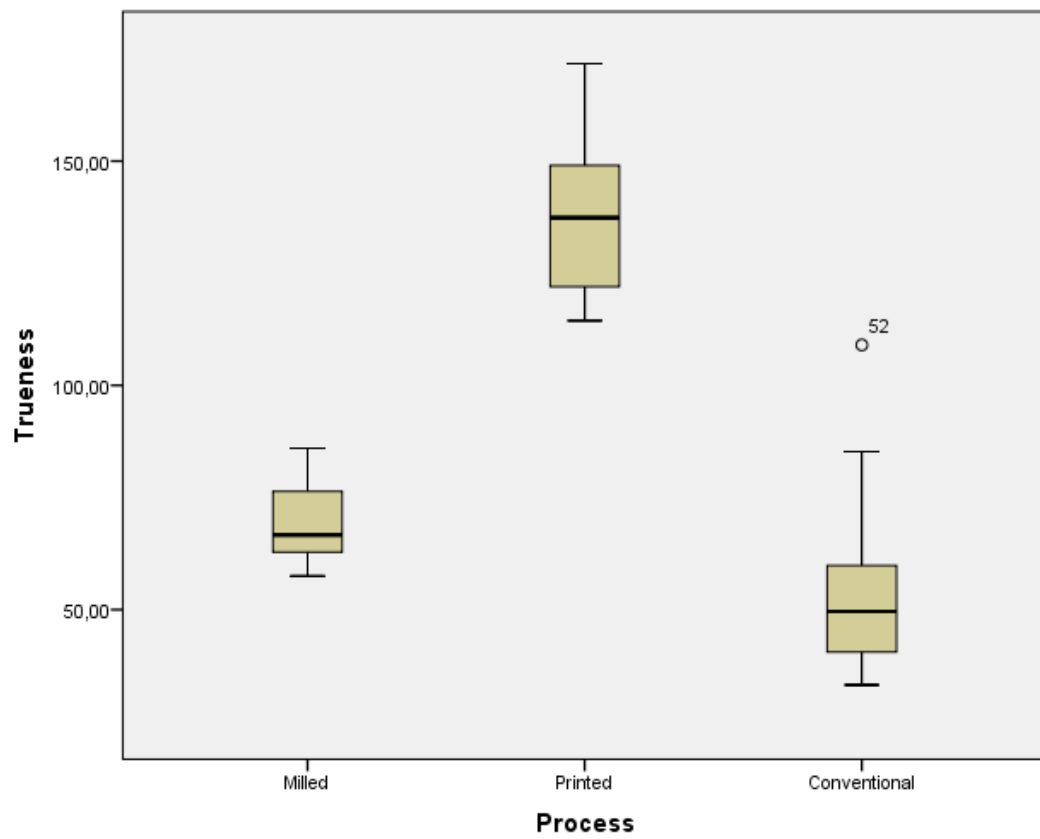
**Figura 6:** Histograma da fidelidade (técnica de fresagem)



**Figuras 7 e 8:** Gráficos *Q-Q plot* da fidelidade (técnica de impressão 3D).



**Figura 9:** Histograma da fidelidade (técnica de impressão 3D)



**Figura 10:** *Boxplots* da fidelidade por tipo de processo.

**APÊNDICE C – *OUTPUTS* DA ANÁLISE DESCRITIVA DAS  
VARIÁVEIS PARA A FIDELIDADE  
(*SPSS*)**



**Tabela 1** - Sumário de processamento dos dados por tipo de processo (fidelidade):

	Processo	Válidos		Excluídos		Total	
		N	%	N	%	N	%
Fidelidade	Fresagem	24	100,0%	0	0,0%	24	100,0%
	Impressão 3D	24	100,0%	0	0,0%	24	100,0%
	Convencional	24	100,0%	0	0,0%	24	100,0%

**Tabela 2** - Análise descritiva por tipo de processo (fidelidade):

Processo		Estatística		Erro padrão
Fidelidade	Fresagem	Média	69,3000	1,73354
		95% Intervalo de Confiança	Lim. Inf.	65,7139
			Lim. Sup.	72,8861
		5% Média Truncada	69,0287	
		Mediana	66,6500	
		Variância	72,123	
		Desvio Padrão	8,49255	
		Mínimo	57,50	
		Máximo	86,00	
		Intervalo	28,50	
		Intervalo Interquartil	13,95	
		Assimetria	,619	,472
		Curtose	-,675	,918
	Impressão 3D	Média	139,6958	3,58146
		95% Intervalo de Confiança	Lim. Sup.	132,2870
			Lim. Inf.	147,1047
		5% Média Truncada	139,2889	
		Mediana	137,4000	
		Variância	307,845	
		Desvio Padrão	17,54551	

	Mínimo		114,40	
	Máximo		171,70	
	Intervalo		57,30	
	Intervalo Interquartil		27,13	
	Assimetria		,375	,472
	Curtose		-,775	,918
Convencional	Média		54,1042	3,68412
	95% Intervalo de Confiança	Lim. Inf.	46,4830	
		Lim. Sup.	61,7254	
	5% Média Truncada		52,4046	
	Mediana		49,6000	
	Variância		325,747	
	Desvio Padrão		18,04845	
	Mínimo		33,20	
	Máximo		109,00	
	Intervalo		75,80	
	Intervalo Interquartil		20,05	
	Assimetria		1,532	,472
	Curtose		2,592	,918



**APÊNDICE D – *OUTPUTS* DA ESTATÍSTICA ANALÍTICA  
PARA A FIDELIDADE  
(SPSS)**



**Tabela 1** - Testes de Normalidade por tipo de processo (fidelidade):

		<i>Kolmogorov-Smirnov<sup>a</sup></i>			<i>Shapiro-Wilk</i>		
	Processo	Estatíst.	df	Sig.	Estatíst.	df	Sig.
Fidelidade	Fresagem	,153	24	,149	,929	24	,091
	Impressão 3D	,134	24	,200*	,929	24	,093
	Convencional	,152	24	,161	,864	24	,004

\*. É um limite inferior da verdadeira significância.

a. Correção da significância de *Lilliefors*.

**Tabela 2** – Teste de *Kruskal Wallis* (fidelidade):**Ranks**

	Processo	N	Mean Rank
Fidelidade	Fresagem	24	32,42
	Impressão 3D	24	60,50
	Convencional	24	16,58
	Total	72	

**Análise Estatística<sup>a,b,c</sup>**

	Fidelidade
Chi-Square	54,212
df	2
Asymp. Sig.	,000

a. Teste de *Kruskal Wallis*

b. Variável de agrupamento: processo

c. Algumas ou todas as significâncias exatas não podem ser calculadas porque não há memória suficiente.

**Tabela 3** – Teste *U de Mann Whitney* técnica de fresagem VS técnica convencional (fidelidade):

**Ranks**

	Processo	N	Mean Rank	Sum of Ranks
Fidelidade	Fresagem	24	32,42	778,00
	Convencional	24	16,58	398,00
	Total	48		

**Análise Estatística<sup>a</sup>**

Fidelidade	
Mann-Whitney U	98,000
Wilcoxon W	398,000
Z	-3,918
Asymp. Sig. (2-tailed)	,000

a. Variável de agrupamento: processo

**Tabela 4** – Teste *U de Mann Whitney* técnica de impressão 3D VS técnica convencional (fidelidade):

**Ranks**

	Processo	N	Mean Rank	Sum of Ranks
Fidelidade	Impressão 3D	24	36,50	876,00
	Convencional	24	12,50	300,00
	Total	48		

**Análise Estatística<sup>a</sup>**

Fidelidade	
Mann-Whitney U	,000
Wilcoxon W	300,000
Z	-5,939
Asymp. Sig. (2-tailed)	,000

a. Variável de agrupamento: processo

**Tabela 5** – Teste *U de Mann Whitney* técnica de fresagem VS técnica de impressão 3D (fidelidade):

***Ranks***

	Processo	N	Mean Rank	Sum of Ranks
Fidelidade	Fresagem	24	12,50	300,00
	Impressão 3D	24	36,50	876,00
	Total	48		

**Análise Estatística<sup>a</sup>**

	Fidelidade
Mann-Whitney U	,000
Wilcoxon W	300,000
Z	-5,939
Asymp. Sig. (2-tailed)	,000

a. Variável de agrupamento: processo



## **APÊNDICE E – VALORES DE *RMS* PARA A PRECISÃO**





**Tabela 1** – Dados de *RMS* para a precisão (técnica convencional):

MC12	MC11	MC10	MC9	MC8	MC7	MC6	MC5	MC4	MC3	MC2	MC1	
0,0434	0,0263	0,0343	0,0302	0,0642	0,0304	0,04	0,0505	0,0802	0,031	0,0347		MC1
0,0407	0,0323	0,032	0,0304	0,0849	0,0328	0,0446	0,0454	0,0918	0,0347		0,0339	MC2
0,0359	0,0177	0,0207	0,0178	0,0592	0,0215	0,021	0,0372	0,0917		0,0337	0,0309	MC3
0,0762	0,0758	0,09	0,0901	0,0901	0,0954	0,1008	0,0774		0,086	0,0943	0,0817	MC4
0,0278	0,0407	0,0449	0,0476	0,0936	0,0472	0,0535		0,0783	0,0379	0,0482	0,0513	MC5
0,058	0,028	0,0337	0,0248	0,0564	0,0302		0,0573	0,0999	0,0215	0,0457	0,0425	MC6
0,0411	0,0214	0,0222	0,0233	0,0623		0,0289	0,0506	0,0934	0,0207	0,0334	0,0302	MC7
0,0838	0,0553	0,0658	0,0535		0,0618	0,0567	0,0951	0,0912	0,0574	0,0833	0,0633	MC8
0,0404	0,02	0,0298		0,0554	0,0237	0,0234	0,0525	0,0946	0,0178	0,0336	0,0331	MC9
0,0409	0,0223		0,0268	0,0679	0,0228	0,0304	0,0444	0,0871	0,0211	0,0293	0,0345	MC10
0,0312		0,0225	0,0194	0,0609	0,0213	0,0286	0,043	0,0805	0,0175	0,0317	0,026	MC11
	0,0289	0,0399	0,0388	0,0845	0,0425	0,0507	0,0286	0,0835	0,0341	0,0391	0,0432	MC12
0,0407	0,027	0,0358	0,0257	0,0615	0,0352	0,0297	0,0486	0,102	0,0266	0,0441	0,0406	MC13
0,0925	0,0707	0,0872	0,0619	0,0818	0,0748	0,0689	0,1093	0,1461	0,0638	0,0961	0,0745	MC14
0,0669	0,0483	0,067	0,0422	0,0824	0,0622	0,0588	0,0823	0,1266	0,0515	0,0742	0,0632	MC15
0,0748	0,0396	0,0423	0,0421	0,0566	0,044	0,0383	0,0865	0,1304	0,0398	0,0578	0,0586	MC16
0,0606	0,0392	0,0395	0,0353	0,0792	0,0335	0,0406	0,0657	0,1106	0,0346	0,0424	0,0515	MC17
0,0439	0,0294	0,0368	0,0232	0,0612	0,0313	0,0335	0,0544	0,0984	0,026	0,0378	0,0401	MC18
0,0384	0,0526	0,0555	0,052	0,0912	0,0631	0,0602	0,0495	0,1098	0,0457	0,0666	0,0576	MC19
0,0789	0,0459	0,0515	0,0386	0,08	0,0405	0,0441	0,0911	0,1243	0,0415	0,0576	0,0561	MC20
0,0762	0,0301	0,0483	0,0344	0,0631	0,0423	0,0432	0,0975	0,1476	0,0362	0,0538	0,0483	MC21
0,0632	0,0291	0,034	0,024	0,0646	0,0293	0,026	0,0776	0,1073	0,0246	0,0463	0,0424	MC22
0,0755	0,0437	0,0419	0,0397	0,0557	0,039	0,0473	0,0855	0,117	0,041	0,0586	0,0495	MC23
0,0406	0,0269	0,0331	0,0206	0,0581	0,0268	0,0285	0,0449	0,0925	0,0223	0,0333	0,0341	MC24

MC24	MC23	MC22	MC21	MC20	MC19	MC18	MC17	MC16	MC15	MC14	MC13
0,0329	0,0511	0,0425	0,0431	0,0632	0,0581	0,0407	0,0506	0,0614	0,0649	0,0792	0,0416
0,0351	0,0586	0,0507	0,0544	0,0627	0,0634	0,04	0,0433	0,0571	0,0716	0,1057	0,0417
0,0236	0,0412	0,024	0,0353	0,0428	0,0455	0,0266	0,0344	0,0418	0,0533	0,0663	0,028
0,087	0,1076	0,107	0,1355	0,1245	0,1056	0,099	0,1106	0,1231	0,1294	0,1383	0,099
0,0424	0,0845	0,0703	0,0872	0,0931	0,0458	0,0559	0,0621	0,0782	0,0823	0,1082	0,0439
0,0303	0,0479	0,0276	0,0424	0,0473	0,0578	0,0341	0,0411	0,041	0,0599	0,0708	0,031
0,0279	0,038	0,0295	0,0379	0,0423	0,0584	0,0305	0,0322	0,0449	0,0557	0,076	0,0351
0,0562	0,0542	0,0577	0,0572	0,0783	0,0887	0,0615	0,0764	0,0594	0,0831	0,0843	0,0592
0,0222	0,0401	0,0244	0,0366	0,0422	0,0513	0,0224	0,0356	0,0423	0,0416	0,0673	0,0263
0,0304	0,0447	0,0336	0,0472	0,0511	0,0511	0,0336	0,0352	0,0405	0,0651	0,0888	0,0337
0,0266	0,0433	0,0278	0,0305	0,0461	0,0493	0,0298	0,0387	0,0401	0,0504	0,073	0,0283
0,0397	0,078	0,0574	0,0782	0,0853	0,0376	0,0428	0,055	0,0718	0,0662	0,0994	0,0388
0,0252	0,0514	0,0328	0,0419	0,0571	0,0447	0,0252	0,0403	0,0433	0,0449	0,0546	
0,0725	0,0629	0,0616	0,0577	0,0789	0,0811	0,0847	0,0914	0,0765	0,0689		0,0568
0,0422	0,0564	0,0438	0,06	0,0874	0,0528	0,0456	0,0713	0,0737		0,0687	0,0418
0,0499	0,0437	0,0445	0,0417	0,0544	0,0765	0,0488	0,0496		0,0724	0,0793	0,0448
0,0355	0,0515	0,0306	0,0471	0,0438	0,0825	0,0348		0,0462	0,0756	0,0901	0,0397
0,0158	0,0472	0,0378	0,0515	0,0556	0,0499		0,0347	0,0495	0,0559	0,0979	0,0263
0,042	0,0795	0,0669	0,0806	0,1015		0,0531	0,0752	0,0894	0,0512	0,0815	0,0494
0,0478	0,0442	0,0419	0,0376		0,0878	0,0539	0,0409	0,0516	0,0826	0,0789	0,0543
0,0457	0,0354	0,0248		0,0415	0,0837	0,0593	0,0466	0,0448	0,0682	0,0592	0,0483
0,0327	0,036		0,0254	0,039	0,0651	0,035	0,0305	0,0403	0,0446	0,0616	0,0347
0,0466		0,0348	0,0323	0,044	0,0756	0,0483	0,0487	0,0431	0,0579	0,063	0,0521
	0,0482	0,0331	0,0443	0,0514	0,0398	0,0159	0,036	0,0506	0,0462	0,073	0,0244

**Tabela 2** – Média dos dados de *RMS* para a precisão (técnica convencional):

	$\bar{X}$
MC1	0,047586957
MC2	0,051643478
MC3	0,03696087
MC4	0,10106087
MC5	0,061952174
MC6	0,044747826
MC7	0,040691304
MC8	0,068843478
MC9	0,038113043
MC10	0,042717391
MC11	0,037673913
MC12	0,054956522
MC13	0,04256087
MC14	0,079156522
MC15	0,063882609
MC16	0,057234783
MC17	0,052613043
MC18	0,045134783
MC19	0,06576087
MC20	0,059634783
MC21	0,055586957
MC22	0,044056522
MC23	0,053947826
MC24	0,0402
$\bar{X}$	0,053613225

**Tabela 3** – Dados de *RMS* para a precisão (técnica de fresagem):

	MF12	MF11	MF10	MF9	MF8	MF7	MF6	MF5	MF4	MF3	MF2	MF1	
0,0319		0,0325	0,0345	0,0284	0,0306	0,0297	0,0244	0,0174	0,0175	0,0203	0,0087		MF1
0,0329		0,0329	0,0319	0,0287	0,0297	0,0266	0,0249	0,0189	0,0194	0,0204		0,0088	MF2
0,0335		0,0342	0,0292	0,0268	0,021	0,0295	0,0223	0,0221	0,018		0,0191	0,0188	MF3
0,0299		0,0293	0,0268	0,0237	0,0176	0,0239	0,0242	0,0175		0,0177	0,0174	0,0158	MF4
0,0369		0,0361	0,0319	0,0291	0,0294	0,0334	0,0235		0,0172	0,0215	0,0162	0,0166	MF5
0,0331		0,0354	0,0311	0,03	0,0263	0,0262		0,0229	0,0221	0,0228	0,0224	0,0236	MF6
0,0337		0,0319	0,0354	0,0336	0,0221		0,0251	0,0327	0,024	0,0257	0,0235	0,0255	MF7
0,0294		0,0293	0,0265	0,0282		0,022	0,026	0,0283	0,0177	0,0202	0,0203	0,0204	MF8
0,0206		0,0211	0,0156		0,0293	0,0354	0,0313	0,0296	0,0252	0,0283	0,0272	0,0285	MF9
0,0206		0,0205		0,0155	0,0286	0,0369	0,0331	0,033	0,0285	0,0314	0,029	0,0323	MF10
0,0148			0,0212	0,02	0,031	0,0336	0,0379	0,037	0,0313	0,0341	0,0319	0,034	MF11
		0,015	0,0216	0,021	0,0313	0,0348	0,0361	0,0391	0,0312	0,0347	0,0322	0,0335	MF12
0,0191		0,0184	0,0153	0,0146	0,0279	0,0311	0,0306	0,0311	0,0245	0,0265	0,0281	0,0305	MF13
0,0201		0,0171	0,0162	0,0189	0,0273	0,0319	0,035	0,0354	0,0258	0,0322	0,0277	0,0295	MF14
0,0186		0,0181	0,0162	0,0163	0,0272	0,0327	0,0328	0,0317	0,0234	0,0278	0,0279	0,0306	MF15
0,0256		0,0224	0,0174	0,0171	0,0284	0,0319	0,0306	0,031	0,0237	0,0256	0,025	0,0283	MF16
0,0231		0,023	0,0197	0,0173	0,0257	0,0282	0,0383	0,037	0,0306	0,0322	0,0284	0,0302	MF17
0,0187		0,0188	0,0155	0,0213	0,0235	0,0292	0,035	0,0388	0,0291	0,0352	0,0297	0,0349	MF18
0,0195		0,0189	0,023	0,0224	0,0276	0,0285	0,0307	0,0326	0,0292	0,0307	0,0285	0,0301	MF19
0,0191		0,0171	0,0206	0,0192	0,0275	0,0275	0,0332	0,0318	0,0299	0,0317	0,0274	0,029	MF20
0,0159		0,0144	0,0195	0,0188	0,0269	0,0315	0,0361	0,0328	0,0287	0,0305	0,028	0,0295	MF21
0,0172		0,0165	0,016	0,0176	0,0271	0,0311	0,0309	0,0306	0,0279	0,0279	0,026	0,0279	MF22
0,0182		0,016	0,0233	0,0233	0,0298	0,0327	0,0364	0,0356	0,0307	0,0326	0,0327	0,0359	MF23
0,0172		0,0165	0,021	0,0212	0,0293	0,0295	0,0353	0,0351	0,0304	0,0343	0,0305	0,0342	MF24

MF24	MF23	MF22	MF21	MF20	MF19	MF18	MF17	MF16	MF15	MF14	MF13
0,0343	0,036	0,027	0,0287	0,0283	0,0297	0,0349	0,0339	0,0266	0,0292	0,029	0,0302
0,0338	0,0346	0,0268	0,0293	0,0283	0,0295	0,0338	0,0341	0,0261	0,0298	0,0288	0,0294
0,0339	0,0319	0,0272	0,0301	0,0316	0,028	0,034	0,0379	0,0241	0,0282	0,0299	0,0263
0,0295	0,0296	0,025	0,0269	0,0277	0,0253	0,0272	0,0293	0,0223	0,0234	0,0245	0,0227
0,0339	0,0362	0,0297	0,033	0,0324	0,0298	0,0365	0,0361	0,03	0,0319	0,0332	0,0312
0,0343	0,0352	0,0295	0,034	0,0324	0,0277	0,0338	0,039	0,0293	0,033	0,0331	0,0291
0,0278	0,0315	0,0291	0,0311	0,0271	0,0276	0,0274	0,0293	0,0283	0,0304	0,0303	0,029
0,0283	0,0295	0,0252	0,0265	0,0255	0,0254	0,0228	0,0262	0,0289	0,0258	0,0267	0,0268
0,0224	0,024	0,018	0,0198	0,021	0,0227	0,0211	0,0194	0,0178	0,0173	0,0197	0,0154
0,0207	0,0251	0,0167	0,021	0,0219	0,0233	0,0179	0,0223	0,0182	0,0175	0,0168	0,0159
0,0172	0,0168	0,016	0,0161	0,0183	0,0202	0,0195	0,0234	0,0218	0,0192	0,016	0,0186
0,0179	0,0194	0,017	0,0168	0,0206	0,0207	0,019	0,0244	0,0255	0,0192	0,0194	0,0192
0,0201	0,0222	0,0159	0,0172	0,0211	0,0209	0,0183	0,0188	0,0167	0,0144	0,0151	
0,0188	0,0207	0,0155	0,0211	0,0179	0,0241	0,0159	0,0216	0,017	0,0142		0,0155
0,0178	0,0223	0,0163	0,0173	0,0188	0,0192	0,0164	0,019	0,0134		0,0141	0,0127
0,0218	0,0271	0,0186	0,0232	0,0212	0,0214	0,0221	0,0195		0,0143	0,017	0,0167
0,0199	0,0252	0,0181	0,0199	0,0197	0,019	0,0192		0,022	0,0194	0,0189	0,016
0,0167	0,0197	0,0181	0,0174	0,0172	0,0209		0,02	0,0234	0,0167	0,0138	0,0159
0,0159	0,0197	0,019	0,0173	0,0176		0,0205	0,0193	0,0227	0,0198	0,0228	0,0204
0,0138	0,0147	0,0164	0,0178		0,018	0,0165	0,0197	0,021	0,018	0,0173	0,0196
0,0175	0,0171	0,015		0,0179	0,017	0,0175	0,0208	0,0215	0,0173	0,02	0,0163
0,0171	0,0192		0,0154	0,0177	0,0194	0,0183	0,0215	0,0178	0,0167	0,0153	0,0165
0,0156		0,0182	0,0169	0,015	0,0195	0,0183	0,0242	0,0281	0,0214	0,0192	0,022
	0,0156	0,0164	0,0169	0,014	0,0162	0,0167	0,0206	0,0254	0,0184	0,02	0,0204

**Tabela 4** – Média dos dados de *RMS* para a precisão (técnica de fresagem):

	$\bar{X}$
<b>MF1</b>	0,027986957
<b>MF2</b>	0,0278
<b>MF3</b>	0,027721739
<b>MF4</b>	0,024226087
<b>MF5</b>	0,029813043
<b>MF6</b>	0,02983913
<b>MF7</b>	0,028786957
<b>MF8</b>	0,025473913
<b>MF9</b>	0,023073913
<b>MF10</b>	0,023769565
<b>MF11</b>	0,023908696
<b>MF12</b>	0,024765217
<b>MF13</b>	0,021669565
<b>MF14</b>	0,022582609
<b>MF15</b>	0,021330435
<b>MF16</b>	0,02303913
<b>MF17</b>	0,023956522
<b>MF18</b>	0,023021739
<b>MF19</b>	0,023334783
<b>MF20</b>	0,022034783
<b>MF21</b>	0,022195652
<b>MF22</b>	0,021373913
<b>MF23</b>	0,024591304
<b>MF24</b>	0,023265217
$\bar{X}$	0,024565036

**Tabela 5** – Dados de *RMS* para a precisão (técnica de impressão 3D):

MI12	MI11	MI10	MI9	MI8	MI7	MI6	MI5	MI4	MI3	MI2	MI1	
0,0306	0,0466	0,0416	0,0407	0,038	0,0462	0,056	0,0368	0,0403	0,0467	0,0454		MI1
0,0514	0,0612	0,0539	0,0473	0,0465	0,05	0,0587	0,0602	0,0567	0,0611		0,0451	MI2
0,0399	0,0318	0,0422	0,0418	0,0444	0,0705	0,0655	0,0424	0,0734		0,0435	0,0474	MI3
0,0461	0,0701	0,0606	0,0544	0,0507	0,0531	0,0516	0,0491		0,0725	0,0544	0,0391	MI4
0,0277	0,0502	0,0376	0,0386	0,0321	0,0541	0,0543		0,0499	0,0413	0,0595	0,0363	MI5
0,0507	0,0694	0,0558	0,0518	0,0529	0,0413		0,0533	0,0543	0,0662	0,0592	0,0573	MI6
0,0504	0,063	0,0503	0,0582	0,0568		0,0404	0,0569	0,0553	0,0717	0,0508	0,0463	MI7
0,0289	0,0457	0,0276	0,0366		0,0567	0,0526	0,0317	0,053	0,0438	0,0491	0,0382	MI8
0,0312	0,0356	0,0349		0,0368	0,0585	0,0517	0,0393	0,0593	0,0414	0,0495	0,0399	MI9
0,0334	0,0418		0,0354	0,0276	0,0501	0,0571	0,0382	0,0622	0,0423	0,0544	0,042	MI10
0,0409		0,0409	0,0357	0,0454	0,0632	0,071	0,0503	0,0724	0,0317	0,0619	0,0464	MI11
	0,0412	0,0331	0,0312	0,0295	0,0486	0,0513	0,0276	0,0491	0,04	0,0544	0,0299	MI12
0,0448	0,0385	0,044	0,0479	0,0434	0,0608	0,0646	0,0521	0,0631	0,0413	0,0464	0,041	MI13
0,0219	0,0413	0,0317	0,0329	0,028	0,0532	0,0528	0,0298	0,0427	0,0422	0,0464	0,0318	MI14
0,0357	0,0474	0,0327	0,0424	0,035	0,0551	0,0621	0,0386	0,0557	0,0497	0,0529	0,0431	MI15
0,0387	0,0316	0,0416	0,0428	0,0443	0,0684	0,0698	0,0448	0,0671	0,0331	0,0413	0,0452	MI16
0,0331	0,0447	0,0303	0,0389	0,0292	0,0521	0,0582	0,0374	0,0545	0,0425	0,0516	0,0372	MI17
0,0257	0,0496	0,0418	0,0369	0,0389	0,0492	0,0479	0,0288	0,0368	0,047	0,0503	0,0331	MI18
0,0535	0,0696	0,0536	0,0614	0,0545	0,0383	0,0551	0,0509	0,0607	0,0683	0,0538	0,0538	MI19
0,0327	0,05	0,0432	0,0423	0,0388	0,0524	0,0585	0,0425	0,0437	0,0543	0,0439	0,0324	MI20
0,0555	0,0401	0,053	0,0523	0,0583	0,0742	0,0662	0,061	0,0771	0,0355	0,0649	0,0568	MI21
0,0383	0,0472	0,0385	0,0453	0,035	0,0528	0,0565	0,0426	0,0555	0,0506	0,0577	0,0443	MI22
0,0302	0,0338	0,0357	0,0329	0,0338	0,0566	0,0528	0,032	0,0514	0,0314	0,0464	0,0373	MI23
0,0288	0,0372	0,0361	0,0348	0,0328	0,0515	0,0562	0,0295	0,0602	0,0366	0,053	0,0356	MI24

МП24	МП23	МП22	МП21	МП20	МП19	МП18	МП17	МП16	МП15	МП14	МП13
0,0376	0,037	0,0447	0,0561	0,0329	0,0544	0,0322	0,0366	0,0445	0,0419	0,0312	0,0411
0,0582	0,0448	0,0582	0,0589	0,0435	0,0533	0,0461	0,0504	0,0407	0,0525	0,0446	0,0451
0,04	0,0318	0,0513	0,0357	0,0543	0,0677	0,0458	0,0428	0,0339	0,0502	0,0428	0,043
0,0615	0,0482	0,0543	0,0746	0,0419	0,0581	0,0355	0,0525	0,064	0,0535	0,0425	0,0542
0,0302	0,0319	0,0421	0,0594	0,0424	0,0494	0,0286	0,0369	0,0451	0,0382	0,0298	0,0528
0,0663	0,0521	0,0552	0,0613	0,0587	0,0546	0,0482	0,055	0,0628	0,062	0,0535	0,0661
0,0567	0,0555	0,0527	0,0743	0,0527	0,0381	0,051	0,05	0,0664	0,0551	0,0557	0,0601
0,0314	0,0339	0,0349	0,0577	0,0389	0,0542	0,0387	0,0294	0,0436	0,0341	0,0283	0,0438
0,0345	0,0329	0,0455	0,0517	0,0426	0,0611	0,0378	0,0386	0,0419	0,0418	0,0332	0,0487
0,036	0,0354	0,0384	0,0525	0,0435	0,0541	0,0411	0,0308	0,0406	0,0319	0,0313	0,0455
0,0403	0,0334	0,0466	0,04	0,051	0,0691	0,0484	0,0443	0,0314	0,0466	0,0406	0,0389
0,0302	0,0294	0,038	0,0538	0,0334	0,053	0,0262	0,0331	0,0386	0,0353	0,022	0,0462
0,0428	0,039	0,0478	0,0536	0,043	0,0694	0,0482	0,0426	0,0358	0,0384	0,0394	
0,0324	0,0318	0,0361	0,0536	0,0341	0,0537	0,0305	0,0305	0,0379	0,0338		0,0402
0,0419	0,0426	0,0432	0,0593	0,0432	0,0653	0,0432	0,035	0,0444		0,0339	0,0391
0,0422	0,0338	0,0504	0,0466	0,047	0,0693	0,0468	0,0437		0,0445	0,0386	0,0368
0,0363	0,0356	0,039	0,051	0,0413	0,0619	0,041		0,042	0,0346	0,0302	0,043
0,0347	0,0326	0,0467	0,056	0,0338	0,0494		0,0406	0,0464	0,0433	0,0305	0,0519
0,057	0,0588	0,0503	0,0796	0,0582		0,0491	0,0614	0,0691	0,065	0,0539	0,0705
0,04	0,0402	0,0405	0,0606		0,0578	0,0332	0,0407	0,0453	0,042	0,0335	0,0419
0,0533	0,0459	0,0601		0,0617	0,0795	0,0555	0,0513	0,0463	0,0592	0,0537	0,0538
0,0398	0,0416		0,0601	0,0409	0,0503	0,046	0,0393	0,0501	0,0431	0,0364	0,0484
0,0177		0,0416	0,0468	0,041	0,0584	0,0322	0,036	0,0346	0,0425	0,0322	0,0398
	0,0161	0,0392	0,051	0,0394	0,0527	0,0316	0,0361	0,0382	0,0419	0,0321	0,0398



**Tabela 6** – Média dos dados de *RMS* para a precisão (técnica de impressão 3D):

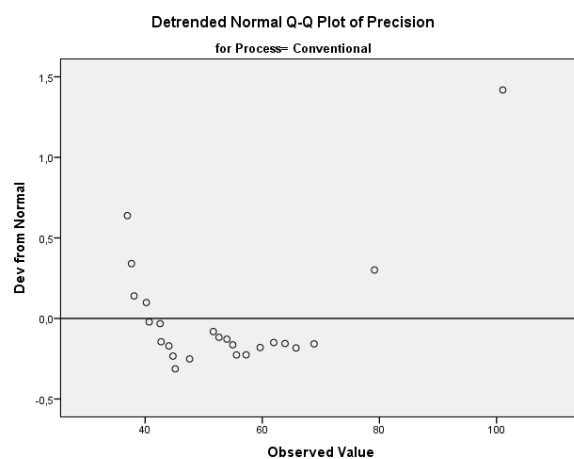
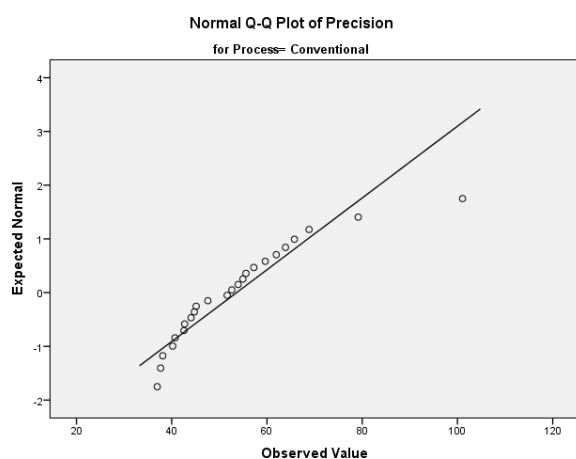
	$\bar{X}$
<b>MI1</b>	0,0417
<b>MI2</b>	0,051669565
<b>MI3</b>	0,047047826
<b>MI4</b>	0,054021739
<b>MI5</b>	0,042104348
<b>MI6</b>	0,056869565
<b>MI7</b>	0,055147826
<b>MI8</b>	0,040556522
<b>MI9</b>	0,042973913
<b>MI10</b>	0,041982609
<b>MI11</b>	0,047408696
<b>MI12</b>	0,038047826
<b>MI13</b>	0,0473
<b>MI14</b>	0,037795652
<b>MI15</b>	0,045282609
<b>MI16</b>	0,046452174
<b>MI17</b>	0,041982609
<b>MI18</b>	0,041386957
<b>MI19</b>	0,05853913
<b>MI20</b>	0,043930435
<b>MI21</b>	0,057182609
<b>MI22</b>	0,0461
<b>MI23</b>	0,0394348
<b>MI24</b>	0,039582609
$\bar{X}$	0,046020834



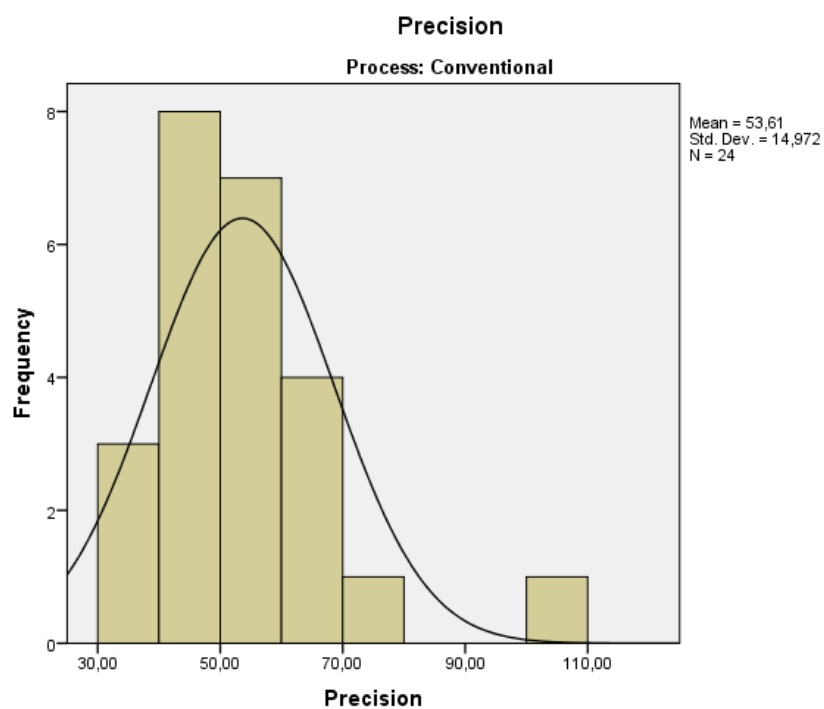
# **ANEXO F – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES NA PRECISÃO**

**(GRÁFICOS *Q-Q PLOT*, HISTOGRAMAS E *BOXPLOTS*)**

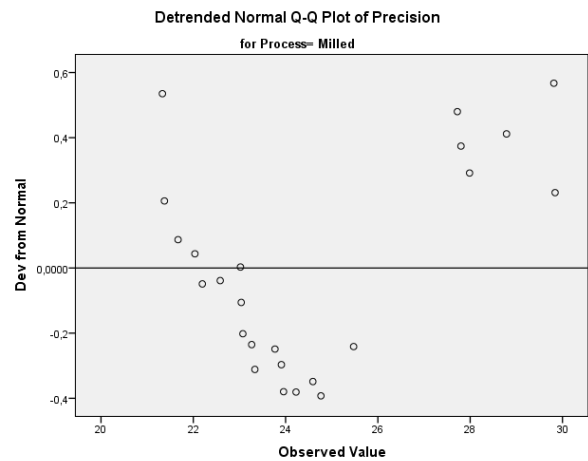
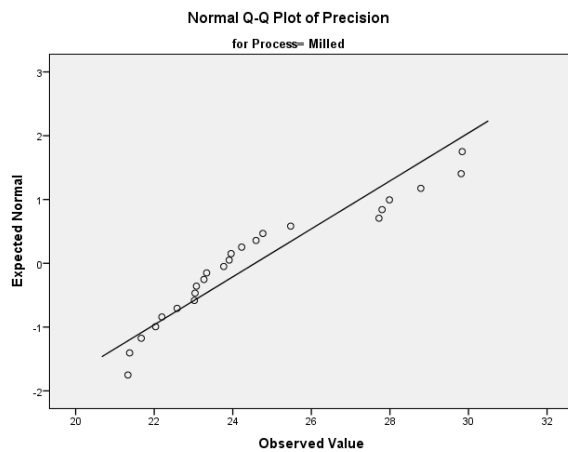




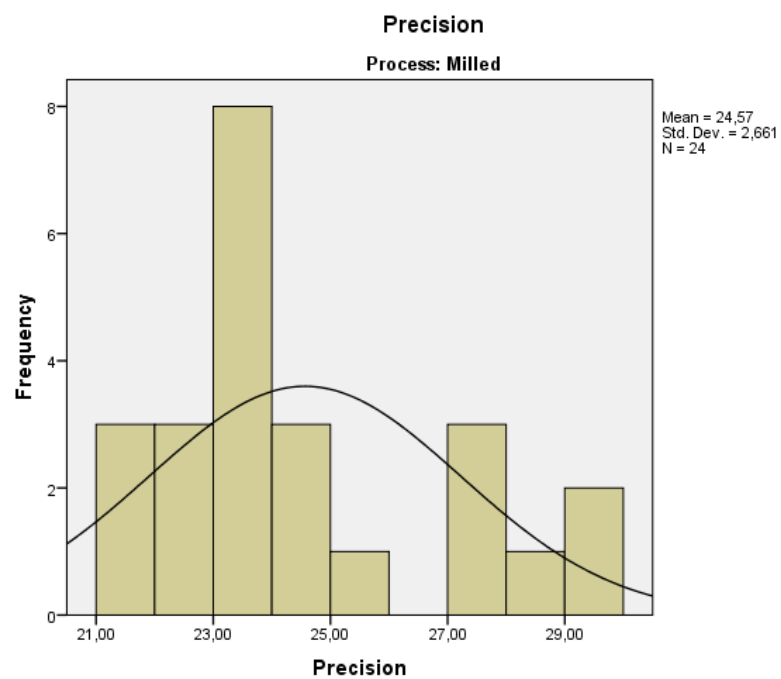
**Figuras 1 e 2:** Gráficos *Q-Q plot* da precisão (técnica convencional).



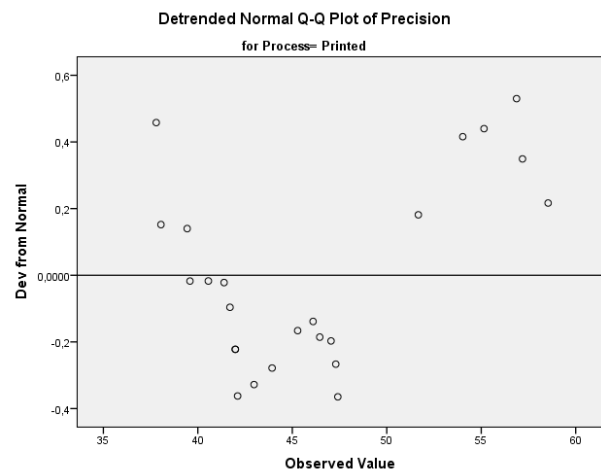
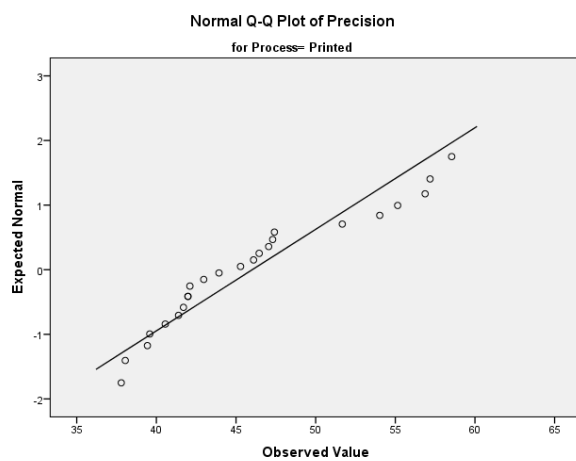
**Figura 3:** Histograma da precisão (técnica convencional).



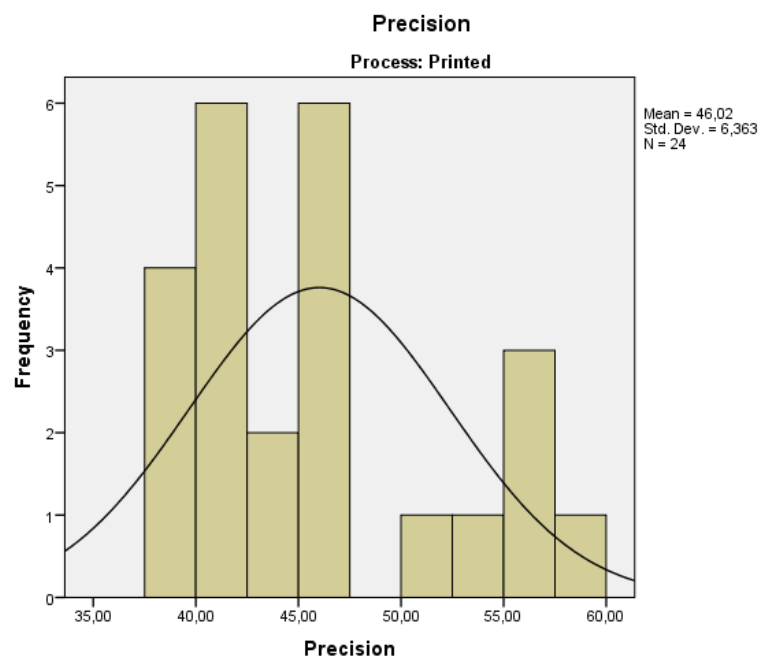
**Figuras 4 e 5:** Gráficos *Q-Q plot* da precisão (técnica de fresagem).



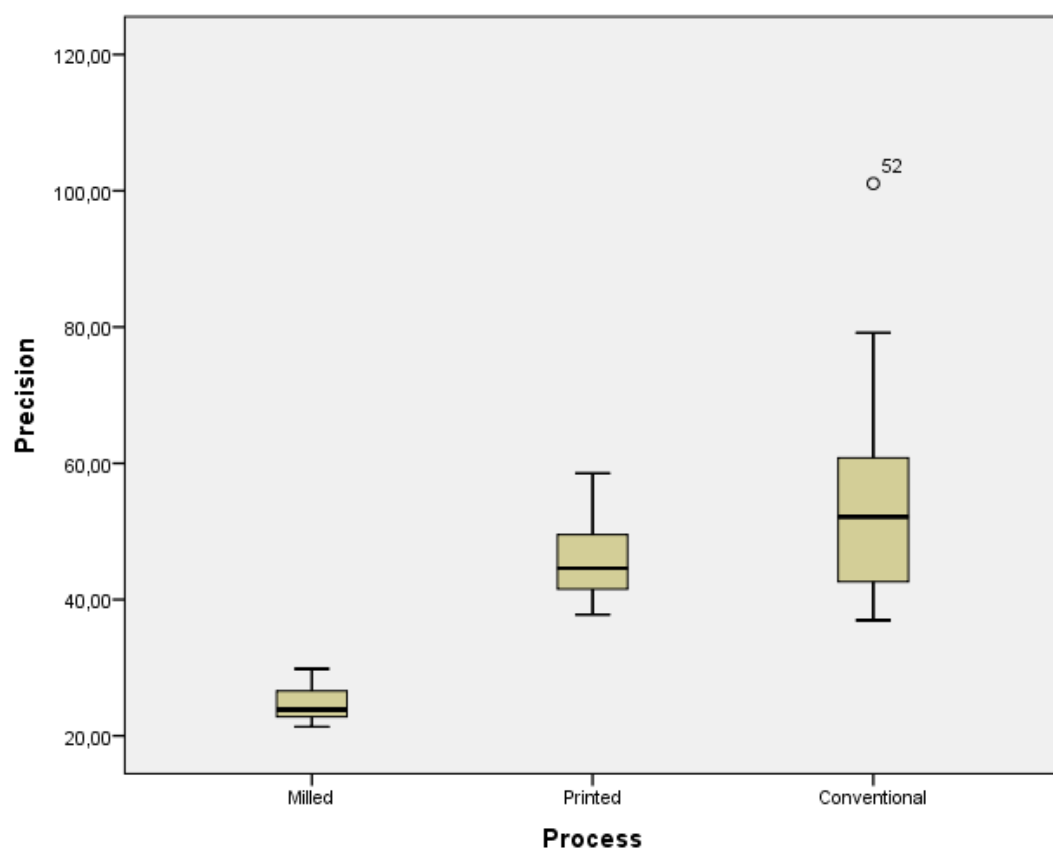
**Figura 6:** Histograma da precisão (técnica de fresagem).



**Figuras 7 e 8:** Gráficos *Q-Q plot* da precisão (técnica de impressão 3D).



**Figura 9:** Histograma da precisão (técnica de impressão 3D).



**Figura 10:** *Boxplots* da precisão por tipo de processo.



**APÊNDICE G – *OUTPUTS* DA ANÁLISE DESCRITIVA DAS  
VARIÁVEIS PARA A PRECISÃO**

*(SPSS)*



**Tabela 1** - Sumário de processamento dos dados por tipo de processo (precisão):

	Processo	Válidos		Excluídos		Total	
		N	%	N	%	N	%
Precisão	Fresagem	24	100,0%	0	0,0%	24	100,0%
	Impressão 3D	24	100,0%	0	0,0%	24	100,0%
	Convencional	24	100,0%	0	0,0%	24	100,0%

**Tabela 2** - Análise descritiva por tipo de processo (precisão):

Processo		Estatística		Erro padrão
Precisão	Fresagem	Média	24,5650	,54316
		95% Intervalo de Confiança	Lim. Inf.	23,4414
			Lim. Sup.	25,6886
		5% Média Truncada	24,4516	
		Mediana	23,8391	
		Variância	7,080	
		Desvio Padrão	2,66091	
		Mínimo	21,33	
		Máximo	29,84	
		Intervalo	8,51	
		Intervalo Interquartil	4,47	
		Assimetria	,828	,472
		Curtose	-,518	,918
Impressão 3D	Impressão 3D	Média	46,0208	1,29885
		95% Intervalo de Confiança	Lim. Inf.	43,3340
			Lim. Sup.	48,7077
		5% Média Truncada	45,7926	
		Mediana	44,6065	
		Variância	40,488	
		Desvio Padrão	6,36302	

	Mínimo		37,80	
	Máximo		58,54	
	Intervalo		20,74	
	Intervalo Interquartil		9,14	
	Assimetria		,718	,472
	Curtose		-,652	,918
Convencional	Média		53,6132	3,05619
	95% Intervalo de Confiança	Lim. Inf.	47,2910	
		Lim. Sup.	59,9354	
	5% Média Truncada		52,0986	
	Mediana		52,1283	
	Variância		224,167	
	Desvio Padrão		14,97220	
	Mínimo		36,96	
	Máximo		101,06	
	Intervalo		64,10	
	Intervalo Interquartil		18,77	
	Assimetria		1,537	,472
	Curtose		3,191	,918

**APÊNDICE H – *OUTPUTS* DA ESTATÍSTICA ANALÍTICA  
PARA A PRECISÃO  
(*SPSS*)**



**Tabela 1** - Testes de Normalidade por tipo de processo (precisão):

		<i>Kolmogorov-Smirnov<sup>a</sup></i>			<i>Shapiro-Wilk</i>		
	Processo	Estatíst.	df	Sig.	Estatíst.	df	Sig.
Precisão	Fresagem	,178	24	,047	,884	24	,010
	Impressão 3D	,164	24	,096	,904	24	,026
	Convencional	,133	24	,200*	,873	24	,006

\*, É um limite inferior da verdadeira significância.

a. Correção da significância de *Lilliefors*.

**Tabela 2** – Teste de *Kruskal Wallis* (precisão):**Ranks**

	Processo	N	Mean Rank
Precisão	Fresagem	24	12,50
	Impressão 3D	24	44,96
	Convencional	24	52,04
	Total	72	

**Análise Estatística<sup>a,b,c</sup>**

Precisão	
Chi-Square	48,718
df	2
Asymp. Sig.	,000

a. Teste de *Kruskal Wallis*

b. Variável de agrupamento: processo

c. Algumas ou todas as significâncias exatas não podem ser calculadas porque não há memória suficiente.

**Tabela 3** – Teste *U de Mann Whitney* técnica de fresagem VS técnica convencional (precisão):

**Ranks**

	Processo	N	Mean Rank	Sum of Ranks
Precisão	Fresagem	24	12,50	300,00
	Convencional	24	36,50	876,00
	Total	48		

**Análise Estatística<sup>a</sup>**

	Precisão
Mann-Whitney U	,000
Wilcoxon W	300,000
Z	-5,938
Asymp. Sig. (2-tailed)	,000

b. Variável de agrupamento: processo

**Tabela 4** – Teste *U de Mann Whitney* técnica de impressão 3D VS técnica convencional (precisão):

**Ranks**

	Processo	N	Mean Rank	Sum of Ranks
Precisão	Impressão 3D	24	20,96	503,00
	Convencional	24	28,04	673,00
	Total	48		

**Análise Estatística<sup>a</sup>**

	Precisão
Mann-Whitney U	203,000
Wilcoxon W	503,000
Z	-1,753
Asymp. Sig. (2-tailed)	,080

b. Variável de agrupamento: processo



**Tabela 5** – Teste *U de Mann Whitney* técnica de fresagem VS técnica de impressão 3D (precisão):

***Ranks***

	Processo	N	Mean Rank	Sum of Ranks
Precisão	Fresagem	24	12,50	300,00
	Impressão 3D	24	36,50	876,00
	Total	48		

**Análise Estatística<sup>a</sup>**

	Precisão
Mann-Whitney U	,000
Wilcoxon W	300,000
Z	-5,939
Asymp. Sig. (2-tailed)	,000

b. Variável de agrupamento: processo



**APÊNDICE I – NOTIFICAÇÃO DE ACEITAÇÃO DO ARTIGO  
CIENTÍFICO SUBMETIDO À REVISTA  
*BRAZILIAN DENTAL SCIENCE***



## [BDS] Notification of Formal Acceptance for BDS {\$ID}

2021-06-26 01:37 AM

Re: Brazilian Dental Science, Article{\$ID}

"Trueness and precision of the reproduction of dental casts by the conventional, milling and 3D printing techniques."

Dear Diogo Cabecinha Viegas, Joana Lima Hermínio, João Fernandes, Fernando Arrobas, João Carlos Roque, João Tiago Mourão, Guilherme Saavedra:

I am pleased to inform you that your manuscript has been accepted for publication in BDS. Your manuscript is now under the editing process prior to publication. After editing the authors will receive a proof for approval, and corrections need to be returned in 72 hours.

If you have any question or concern, please email [bds@ict.unesp.br](mailto:bds@ict.unesp.br).

Thank you for submitting your work to BDS.

Sincerely,

\_ Brazilian Dental Science Institute of Science and Technology of São José dos Campos Universidade Estadual Paulista - UNESP <http://ojs.ict.unesp.br/> ATENÇÃO: Mensagem de envio automático. Por favor, não responda.



**APÊNDICE J - ARTIGO CIENTÍFICO SUBMETIDO À  
REVISTA *BRAZILIAN DENTAL SCIENCE***





## TITLE

Trueness and precision of the reproduction of dental casts by the conventional, milling and 3D printing techniques.

## ABSTRACT

**Objective:** To compare the reproduction trueness and precision of dental casts made by the conventional, milling and 3D printing techniques.

**Material and Methods:** From an upper right side half-arch reference model (RM), 72 models were obtained and divided into three groups: conventional (CM), milled (MM) and printed (PM). All models were scanned and converted into standard tessellation language (.STL) files. The files were superimposed using 3D analysis software, and statistical analysis was performed using the root mean square (RMS) values obtained. The Shapiro-Wilk test was used to assess normality, and the Kruskal-Wallis test was used to compare groups ( $p < \alpha$ ;  $\alpha = 0.05$ ). The Mann-Whitney U test was used for multiple comparisons among groups ( $p < \alpha$ ;  $\alpha = 0.017$ ).

**Results:** There were significant differences in trueness ( $p = 0.000$ ;  $p < 0.001$ ) and precision ( $p = 0.000$ ;  $p < 0.001$ ) among the three dental cast groups. Regarding trueness, CM presented better results, followed by MM and PM. Regarding precision, MM showed better results, followed by PM and CM, which did not show significant differences.

**Conclusions:** For dental cast reproduction the conventional technique has the best trueness and the milling technique has the best precision.

**Keywords:** trueness, precision, milling, 3D printing, dental cast.

## TÍTULO

Fidelidade e precisão de modelos de trabalho reproduzidos pelas técnicas convencional, de fresagem e de impressão 3D.

## RESUMO

**Objetivo:** Comparar a fidelidade e precisão de reprodução de modelos de trabalho pelas técnicas convencional, de fresagem e de impressão 3D.

**Material e métodos:** A partir de um modelo de referência (MR) de uma hemi-arcada superior direita, foram obtidos 72 modelos divididos em três grupos: convencionais (MC), fresados (MF) e impressos (MI). Todos foram digitalizados e convertidos sob a forma de ficheiros .STL (*standard tessellation language*). Os ficheiros foram sobrepostos utilizando um software de análise 3D, e através dos valores RMS (raiz do valor quadrático médio) obtidos foi realizada a análise estatística. Para avaliação da normalidade foi utilizado o teste *Shapiro Wilk* e para a comparação entre grupos foi utilizado o teste *Kruskal-Wallis* ( $p < \alpha$ ;  $\alpha = 0.05$ ). Para as comparações múltiplas entre grupos, foi utilizado o teste *U de Mann-Whitney* ( $p < \alpha$ ;  $\alpha = 0.017$ ).

**Resultados:** Existem diferenças significativas de fidelidade ( $p = 0.000$ ;  $p < 0.001$ ) e precisão ( $p = 0.000$ ;  $p < 0.001$ ) entre os três grupos. Em relação à fidelidade, MC apresentou melhores resultados, seguido por MF e MI. Em relação à precisão, MF apresentou melhores resultados, seguido por MI e MC, que não apresentaram diferenças significativas entre si.

**Conclusão:** Para reprodução de modelos de trabalho, a técnica convencional é a que apresenta maior fidelidade e a técnica de fresagem a que apresenta maior precisão.

**Palavras-chave:** fidelidade, precisão, fresagem, impressão 3D, modelo de trabalho.

## 1. INTRODUCTION

In recent years, digital workflows have shown exponential development in the field of dentistry.<sup>1-3</sup> This is due to the development of computer-aided design/computer-aided manufacturing (CAD/CAM) technology, which is divided into three components: digitalization of information, processing software and a production component that converts information into a physical object with predetermined characteristics.<sup>2,4</sup>

Compared to the conventional impression technique, digital impression has been found to be faster and more comfortable for the patient, and it presents a level of accuracy compatible with clinical needs.<sup>4-8</sup> The acquired information is organized in a 3D coordinate system.<sup>9</sup> In most cases, digital formatting uses an .STL (standard tessellation language) file.<sup>4,9</sup>

Digital prosthodontics enables the 3D recreation of an individual model, digital or physical.<sup>2,10</sup> Dental casts are extremely important in the diagnosis and treatment plan for fixed prosthodontics, considering that adaptation is the main characteristic necessary to ensure rehabilitation success and that without a physical model, the adaptation between the abutment and the prosthetic piece cannot be evaluated before the prosthesis is inserted.<sup>4,11</sup>

Producing physical models using digital technology is still an expensive process when compared to the conventional technique, but it has the great advantage of reducing the risk of human error.<sup>3,12</sup> In digital dentistry, discrepancies from reality may arise with each procedure performed. For this reason, dimensional changes of up to 200 µm are considered clinically acceptable; these are more evident in the Z axis of the 3D plane.<sup>4,13,14</sup>

Using the CAD/CAM system, physical dental casts can be fabricated by subtraction or addition by using milling or 3D printing techniques, respectively.<sup>2</sup>

In subtraction, a block or disc of material is worn until the desired final geometry is achieved.<sup>15,16</sup> In contrast, the 3D printing method allows objects to be recreated via the

deposition of layers of polymerizable material and can be based on several systems, such as stereolithography (SLA), triple jetting technology (PolyJet) or digital light processing (DLP).<sup>17-22</sup> This technique has the advantages of lower material consumption – material use is reduced by approximately 40% compared to the subtraction technique, and approximately 95% to 98% of the remaining material can be recycled.<sup>12</sup> It also allows the reproduction of several elements at the same time, thus making clinical and laboratory practice more efficient.<sup>1</sup>

Accuracy is expressed in terms of trueness and precision. Trueness represents how close the actual value is to the supposed value, while precision represents the closeness of repeated actual measurements to the supposed value.<sup>4,23</sup> There is some disagreement in the literature regarding the accuracy of dental casts reproduced using the digital milling technique:

In a study comparing the accuracy of dental casts reproduced using the conventional and milling techniques, models of an individual tooth were evaluated; the conventional technique showed better results, and these differences were more significant for the occlusal surface.<sup>24</sup>

In the comparison between conventional dental casts and dental casts printed using the SLA technique, some studies found greater accuracy associated with conventional plaster models.<sup>25-27</sup> In contrast, others did not find significant differences.<sup>28-30</sup>

When conventional models and models printed using the SLA and PolyJet techniques were evaluated, it was found that the conventional method had better trueness and that the PolyJet technique had better precision.<sup>31</sup> Among conventional models and models printed using the DLP and PolyJet techniques, the conventional models showed better trueness and precision due to the smaller dimensional changes presented. However, among the 3D printing techniques, DLP with ultraviolet polymerization showed the best results.<sup>3</sup>

When comparing milled and SLA-printed full-arch models, 3D printing showed superior accuracy.<sup>33</sup> In contrast, another study found the milling technique to be more reliable than the PolyJet technique.<sup>34</sup> A more recent study showed that printed models have greater trueness and precision than milled models; however, the results obtained raised questions regarding the applicability of these models in prosthodontics.<sup>35</sup>

The reproduction accuracy of models fabricated by the conventional, milling, SLA and DLP techniques was also evaluated for inlay, crown, bridge and full-arch preparations. For full-arch reproduction, the conventional model showed greater accuracy, and the milling technique showed the best overall precision. Regarding trueness, similar results were obtained with all techniques for these preparations.<sup>36</sup>

The literature confirms that milled and printed models show acceptable accuracy compatible with clinical practice for fixed prosthodontics in several situations: marginal adaptation of crowns on teeth,<sup>37-39</sup> marginal adaptation of inlays,<sup>40</sup> tooth-supported bridges,<sup>41,42</sup> crowns on implants<sup>43</sup> and implant-supported bridges.<sup>44</sup> In all of these studies, the 3D printing technique showed the best precision and trueness, except in the case of the adaptation of inlays, where milling was the technique with the best accuracy.<sup>40</sup>

The objective of this study was to compare the trueness and precision of the reproduction of dental casts by the conventional, milling and 3D printing techniques. The null hypothesis was that there are no significant differences in trueness among the conventional, milling or 3D printing methods used to obtain dental casts; and that there are no significant differences in precision among the conventional, milling or 3D printing methods used to obtain dental casts.

## 2 MATERIAL AND METHODS

### 2.1 Production of the Reference Model (RM)

As a reference, a model of an upper right side half-arch missing second pre-molar tooth and with the preparation of first pre-molar and first molar teeth for a three-unit bridge (Fig. 1) was used. The model was milled in polymer (Model Blank Beige 95H39, ZirkonZahn GmbH, Bruneck, Italy; REF: 8526). From the RM, 72 models were obtained and were divided into three groups: 24 conventional models (CM), 24 milled models (MM) and 24 printed models (PM).



Fig. 1. Palatal (A), vestibular (B) and occlusal (C) views of the reference model.



## 2.2 Production of Conventional Models (CM) [n = 24]

The CMs were produced from 24 RM impressions obtained by the two-step technique using polyvinylsiloxane material with fluid (Virtual, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein; REF: UL2299 / WL2324) and putty consistency (Virtual, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein; REF:WL2435) and a polymerization time of 4.5 minutes. Individual trays were prepared, obtained from an .STL file and impressed in resin (Dental SG, Formlabs, Inc., Massachusetts, USA; REF:XK221N04), as shown in Fig. 2. An adhesive (VPS Tray Adhesive Refill, 3M ESPE, Minnesota, USA; REF:419032) was applied to increase the bond between the tray and the impression material.



**Fig. 2.** Vestibular (A) and palatal (B) views of an individual tray made using the reference model.

After 1 hour, which is the manufacturer-recommended time required for the release of induced stresses and the elastic recovery of the impression material used, the moulds were filled with type IV plaster (Fujirock, GC Europe, Leuven, Belgium; REF: 1803284). Complete crystallization was allowed to proceed for 1 hour. The plaster models were separated from the impressions with a single laterolateral movement and stored for 48 hours at room temperature until analysis.

### 2.3 Production of Milled Models (MM) [n = 24]

A digital impression of the RM was made with a TRIOS 3 scanner (3Shape A/S, Copenhagen, Denmark), that was shown to be the most accurate scanner in a previous study,<sup>45</sup> and the information was converted into an .STL file. The MMs were fabricated with a M4 milling machine unit (ZirkonZahn GmbH, Bruneck, Italy; Fig. 3) in polymer (Model Blank Beige 95H24, ZirkonZahn GmbH, Bruneck, Italy; REF:12958) with 2mm, 1mm, 0.5mm and 0.3mm burs.



**Fig. 3.** Representative image of the M4 milling unit (ZirkonZahn GmbH, Bruneck, Italy) used in this study.

Available at <https://www.zirkonzahn.com/en/cad-cam-systems/milling-unit-m4>. Access September 2020.

### 2.4 Production of Printed Models (PM) [n = 24]

To produce the PM, the aforementioned .STL file obtained from the digital impression of the RM was used. The models were prepared using a Form 2 printer (Formlabs, Inc., Massachusetts, USA), shown in Fig. 4, which uses SLA technology with a computer-controlled moving laser beam, pre-programmed to produce 50µm resin layers (White V4 resin, Formlabs, Inc., Massachusetts, USA; REF:RS-F2-GPWH-04), cured by UV light (405nm).





**Fig. 4.** Representative image of the Form 2 printer (Formlabs, Inc., Massachusetts, USA) used in this study.

Available at <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/>. Access September 2020.

## 2.5 3D Analysis

To standardize the measurements, all reproduced models were digitized with the aid of a laboratory scanner (S600 Arti, ZirkohnZahn GmbH) and converted into .STL files, standard for CAD/CAM data exchange format.<sup>25-27</sup> The calibration of the scanner was performed by applying a standard calibration plaque and selecting the option “Calibrate scan” on ZirkohnZahn Scan software (ZirkohnZahn GmbH) according to the manufacturer recommendations.<sup>45</sup>

STL records were converted into point cloud data and then superimposed one to the other by computing all possible orientations and selecting the one with the best object-to-object penetration (best-fit alignment), as depicted in Fig. 5.



groups with an identical coordinate system.<sup>25-27,31,35,41</sup> Thus, a high RMS value indicates a large difference between the superimposed data sets, and a low RMS value indicates a high similarity.<sup>25,31</sup> There for the trueness and precision of a corresponding data group can be calculated using a single scale.<sup>41</sup>

The trueness was evaluated by overlapping the RM file with the CM, MM and PM files individually, and precision was evaluated by overlapping the files within each group.

## 2.6 Statistical Analysis

Regarding sample size, it was estimated through power analysis as it is a recurring approach in statistical theory.<sup>45</sup> Given the researchers' experience and the literature review, the decision was to perform an a priori calculation of the sample size considering a large effect size for the Anova-one-way test ( $f=0.40$ ).<sup>47</sup> These calculations were performed using the software G-Power\*.<sup>48</sup> For a minimum test power ( $1-\beta$ ) of 0.8 and an  $\alpha$  significance level of 0.05, the minimum sample size for the comparison of three groups would be 66 observations (22 in each group). Our sample size was 72 (24 in each group).

The Shapiro-Wilk test was used to evaluate the normal distribution of the results, and the Kruskal-Wallis test was used to compare the groups. The significance level was defined as  $p < \alpha$ , where  $\alpha = 0.05$ .

The Mann-Whitney U test was used for multiple comparisons among groups. Bonferroni correction was performed, after which  $\alpha$  assumed the value of 0.017; therefore, the significance level of this test decreased and was defined as  $p < 0.017$ . The effect size ( $r$ ) was also calculated using the equation  $r = \frac{z}{\sqrt{(n)}}$ .

The statistical data were processed and analysed using IBM SPSS Statistics 23 (SPSS, Inc., Chicago, IL, USA).

### 3 RESULTS

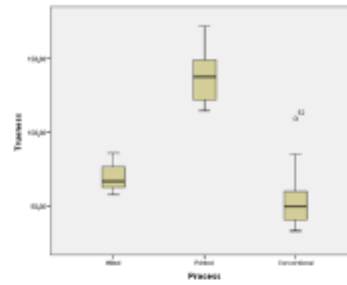
The three groups were analysed and compared in terms of trueness and precision.

#### 3.1 Trueness

The descriptive statistics, assessment of normality and hypothesis tests related to trueness are shown in Table 1 and Fig. 7.

**Table 1.** Evaluation of the effect of process type on trueness.

Dependent variable: Trueness			
Descriptive statistics and assessment of normality:	<u>CM (n=24):</u>	<u>MM (n=24):</u>	<u>PM (n=24):</u>
	$\bar{X} \pm s = 54.104 \pm 18.048 \mu\text{m}$	$\bar{X} \pm s = 69.300 \pm 8.493 \mu\text{m}$	$\bar{X} \pm s = 139.696 \pm 17.546 \mu\text{m}$
	$\tilde{X} = 49.600 \mu\text{m}$	$\tilde{X} = 66.650 \mu\text{m}$	$\tilde{X} = 137.400 \mu\text{m}$
	Min. = 33.20 $\mu\text{m}$ Max. = 109.00 $\mu\text{m}$	Min. = 57.50 $\mu\text{m}$ Max. = 86.00 $\mu\text{m}$	Min. = 114.40 $\mu\text{m}$ Max. = 171.70 $\mu\text{m}$
	SW(24) = 0.864, $p=0.004$	<u>Shapiro-Wilk normality test:</u> SW(24) = 0.929, $p=0.091$	SW(24) = 0.929, $p=0.093$
Decision:	The null hypothesis of normality in at least one of the groups (group I) is rejected.		
Hypothesis tests:	<u>Nonparametric Kruskal-Wallis test:</u>		
Mean ranks:	16.58	$p=0.000, p<0.001$ 32.42	60.50
Decision:	Rejection of the null hypothesis. There is at least one comparison among the groups that is statistically significant.		



**Fig. 6.** Boxplots of trueness by process type.

Regarding normality, the Shapiro-Wilk test indicated that the distribution of the results was not normal only in the CM group ( $p < \alpha$ ). The Kruskal-Wallis test revealed significant differences among the three groups ( $p < 0.001$ ), with CM showing the best trueness.

The Mann-Whitney U test was used for trueness intergroup comparisons, and the results are described in Table 2.

**Table 2.** Evaluation of the effect of process type on trueness: Multiple comparisons.

Hypothesis tests:	Dependent variable: Trueness		
	CM (n=24) vs MM (n=24) U = 98.000, $p < 0.001$	Mann-Whitney test: <sup>1</sup> CM (n=24) vs PM (n=24): U = 0.000, $p < 0.001$	MM (n=24) vs PM (n=24) U = 0.000, $p < 0.001$
Decision:	Rejection of the null hypothesis. There are statistically significant differences.	Rejection of the null hypothesis. There are statistically significant differences.	Rejection of the null hypothesis. There are statistically significant differences.
Mean ranks:	CM = 16.58 MM = 32.42	CM = 12.50 PM = 36.50	MM = 12.50 PM = 36.50
Effect size:	$r = 0.565$ (the effect size is large)	$r = 0.857$ (the effect size is large)	$r = 0.857$ (the effect size is large)

<sup>1</sup> Bonferroni correction of the significance level was performed, and  $\alpha$  assumed the value of 0.017.

A significant difference was found between CM and MM, and CM had better results ( $p < \alpha$ ). There were also significant differences between CM and PM, with CM showing better trueness ( $p < \alpha$ ). MM and PM also showed significant differences from each other, with MM showing the best results ( $p < \alpha$ ). All significant results showed a large effect size ( $r > 0.5$ ).

### 3.2 Precision

Descriptive statistics and hypothesis tests related to precision are shown in Table 2 and Fig. 8.

**Table 3.** Evaluation of the effect of process type on precision.

Dependent variable: Precision			
Descriptive statistics and assessment of normality:	<b>CM (n=24):</b>	<b>MM (n=24):</b>	<b>PM (n=24):</b>
	$\bar{X} \pm s = 53.613 \pm 14.972 \mu\text{m}$	$\bar{X} \pm s = 26.565 \pm 2.661 \mu\text{m}$	$\bar{X} \pm s = 46.021 \pm 6.363 \mu\text{m}$
	$\tilde{X} = 52.128 \mu\text{m}$	$\tilde{X} = 23.839 \mu\text{m}$	$\tilde{X} = 44.6065 \mu\text{m}$
	Min. = 36.96 $\mu\text{m}$ Max. = 101.06 $\mu\text{m}$	Min. = 21.33 $\mu\text{m}$ Max. = 29.84 $\mu\text{m}$	Min. = 37.80 $\mu\text{m}$ Max. = 58.54 $\mu\text{m}$
	SW(24) = 0.873, $p=0.006$	<u>Shapiro-Wilk normality test:</u> SW(24) = 0.884, $p=0.010$	SW(24) = 0.904, $p=0.026$
Decision:	The null hypothesis of normality in at least one of the groups (group II) was rejected.		
Hypothesis tests:	<u>Nonparametric Kruskal-Wallis test:</u> $p=0.000, p<0.001$		
Mean ranks:	52.04	12.5	44.96
Decision:	Rejection of the null hypothesis. There is at least one comparison between groups that is statistically significant.		

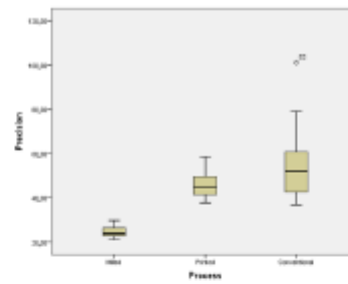


Fig. 7. Boxplots of precision by process type.

The results obtained for all groups indicating that the distribution of the results was not normal ( $p < \alpha$ ). The Kruskal-Wallis test revealed significant differences among the groups ( $p < 0.001$ ), with MM showing the best results.

The Mann-Whitney U test was used for the precision intergroup comparison, and the results are described in Table 4.

Table 4. Evaluation of the effect of process type on precision: Multiple comparisons.

Dependent variable: Precision			
Hypothesis tests:	CM (n=24) vs MM (n=24) U = 0.000, p<0.001	Mann-Whitney test: <sup>1</sup> CM (n=24) vs PM (n=24): U = 203.000, p=0.080	MM (n=24) vs PM (n=24) U = 0.000, p<0.001
Decision:	Rejection of the null hypothesis. There are statistically significant differences.	The null hypothesis is retained. There are no statistically significant differences.	Rejection of the null hypothesis. There are statistically significant differences.
Mean ranks:	CM = 36.50 MM = 12.50	CM = 28.04 PM = 20.96	MM = 12.50 PM = 36.50
Effect size:	r = 0.857 (The effect size is large)	r = 0.253 (The effect size is small)	r = 0.857 (The effect size is large)

<sup>1</sup> Bonferroni correction of the significance level was performed, and  $\alpha$  assumed the value of 0.017.

There were significant differences between CM and MM ( $p < \alpha$ ), with MM showing greater precision. In contrast, there were no significant differences between CM and PM ( $p > \alpha$ ). There were significant differences between MM and PM ( $p < \alpha$ ), with MM showing better results. Only the comparison between the CM and PM groups had a low effect size ( $0.2 \leq r < 0.5$ ).

## 4 DISCUSSION

In this section, knowing that the null hypothesis was rejected, we analyse and discuss the results, taking into account the dependent and independent study variables and their possible combinations.

### 4.1 Trueness

Trueness represents the closeness between the mean value obtained from a series of test results and a reference value and can be influenced by systematic errors that depend mainly on the limitations of the work instruments, the technique used and the operator experience.<sup>23,49</sup>

Thus, the crucial step for error propagation arises during data acquisition.<sup>5,14</sup> Video-based systems are considered more accurate; therefore, in this study, an ultrafast optical-sectioning system was used.<sup>9,14,33</sup> TRIOS 3 scanner (3Shape A/S, Copenhagen, Denmark), that was shown to be the most accurate scanner in a previous study, has a trueness of  $6.9 \pm 0.9 \mu\text{m}$ ,<sup>50</sup> a precision of  $4.5 \pm 0.9 \mu\text{m}$ <sup>50</sup> and a resolution of 41.21 points per  $\text{mm}^2$ ,<sup>51</sup> and considering that these scanner was only used to collect information from digital groups, we consider the possibility of a influence of the type of scanner on the results obtained.<sup>50</sup>



In this study, the conventional technique showed significantly better trueness than the digital techniques of milling ( $p < 0.001$ ) and 3D printing ( $p < 0.001$ ). Kim et al.<sup>24</sup> validated the results obtained for the milling technique. Other studies also confirm the results obtained for the 3D printing technique.<sup>25,26,31,32</sup> In contrast, Sim et al.<sup>27</sup> and Choi et al.<sup>36</sup> did not find significant differences when comparing techniques.

In the conventional group, the impression material used was elastomer, which is currently considered the standard for diagnosis and treatment plans.<sup>33,36</sup> This type of material provides more detailed reproduction and dimensional stability.<sup>1,3,10,52</sup> Regarding the fabrication of the model, type IV plaster was used, which has low setting expansion and high fracture strength.<sup>53</sup>

It is known that at each stage of the process of reproducing conventional models the risk of human error increases, mainly because this technique involves greater manipulation by the operator and is dependent on his or her experience.<sup>1-8</sup> To counteract these influence, correct and careful handling of the materials according to the manufacturer's instructions was necessary.<sup>7,53</sup>

According to the results obtained, although the milling technique presented lower results than the conventional technique, it was more reliable than the 3D printing technique ( $p < 0.001$ ), and this difference was statistically significant. The study of Yau et al.<sup>34</sup> corroborates the results obtained; however, the same does not occur in other studies.<sup>33,35</sup> Similar contradiction can be observed in comparative studies on the adaptation of prosthetic pieces;<sup>37-44</sup> however, for inlays, which are small and highly detailed pieces, milling showed the best results.<sup>40</sup>

With the milling technique, the shape and thickness of the drills and the ability of the unit to rotate an object are directly related to the trueness of the geometric shape

fabricated.<sup>11-13,16</sup> In this study, a milling unit equipped with 5 + 1 axes was used, thus obtaining greater accuracy.<sup>3,15</sup>

Regarding the 3D printing technique, an SLA printer was used that allows the polymerization of layers of material of uniform thickness using a UV laser beam.<sup>17-19</sup> Al-Imam et al.<sup>26</sup> found that the trueness of the printed models is directly related to the system used, and there were significant differences among models fabricated with different printers, but this was not observed regarding precision. According to Camardella et al.,<sup>30</sup> dimensional changes relative to the reference model are mainly due to the associated polymerization shrinkage. Keating et al.<sup>28</sup> confirmed that these changes are greater in the Z plane.<sup>20,27-29</sup> According to Chockalingam et al.,<sup>22</sup> a maximum thickness of 125  $\mu\text{m}$  is related to lower residual stress caused by the associated polymerization shrinkage (changes may vary between 6 and 10%).

In addition to thickness, the acrylic resin used and its degree of conversion, the laser size and intensity and the final surface treatment procedures influence the cascade of errors that may be associated with the reproduction of objects by SLA.<sup>8,20-22</sup> In the present case, the finishing procedures recommended by the manufacturer involve using UV light and heat, thus improving the mechanical properties of the object. This process can enhance shrinkage and deformation.<sup>28</sup>

## 4.2 Precision

Precision provides information on the degree of agreement of the individual measurement values of a dataset. It is therefore independent of the reference value. Thus, precision depends on the presence of random or accidental errors, which are influenced by the external conditions of repeatability and reproducibility.<sup>23,49</sup>

To reduce the probability of this type of error, data acquisition was performed extraorally to avoid distortions caused by the environment, such as the patient's movements and the presence of fluids.<sup>5,7,8,33</sup> The scanner that was used (S600 Arti, ZirkohZahn GmbH) has a precision  $\leq 10 \mu\text{m}$ ,<sup>54</sup> and the same scanner was used for data treatment for all groups, which excluded the possibility that it would have a negative influence on the results obtained.

In this study, the milling technique was found to be significantly more accurate than the conventional ( $p < 0.001$ ) and 3D printing ( $p < 0.001$ ) techniques. Yau et al.<sup>34</sup> obtained similar results, and when compared with other techniques, milling showed the best precision.<sup>36</sup> Patzelt et al.<sup>33</sup> obtained divergent results; however, the fact that a different scanner was used for each group may have influenced their results.<sup>14</sup> Jeong et al.<sup>35</sup> also contradicts the results obtained; however, they used a 100- $\mu\text{m}$ -thick drill bit, and thus, the reproduction detail was lower. In addition, two models per block were reproduced as a way to reduce fatigue, which may have contributed to reduce the accuracy associated with the reproduction of the milled models.<sup>35</sup>

The milling technique involves errors that can be caused by the physical contraction or expansion of the wearing instruments, their excessive vibration or bending due to the wear forces exerted, which reduces their effectiveness with each use.<sup>15,16</sup>

In this study, although the conventional and the 3D printing techniques presented results that were inferior to those of the milling technique, they showed no significant differences in precision ( $p > \alpha$ ). In the literature, some studies corroborate the results obtained,<sup>28-30</sup> however, some argue that the conventional technique has better precision than the 3D printing technique,<sup>25-27</sup> and Jin et al.<sup>31</sup> obtained contradictory results.

To ensure precision and adequate long-term dimensional stability in dental casts reproduced by using the conventional technique, it is necessary to ensure an adequate and

stable environmental temperature and correct mould disinfection, material packaging and elapsed time between phases.<sup>52,53</sup> The disregard of any of these conditions may explain the existence of an outlier in the data of this group and may have influenced the results obtained; however, we found that excluding this outlier would not affect the statistical results.

Regarding the 3D printing technique, Jin et al.<sup>31</sup> found that it had superior precision and that the PolyJet technique showed better results than the SLA technique, which was confirmed by Park and Shin.<sup>32</sup> Thus, we can infer that the printing method may have influenced the results obtained. Printed objects are also more sensitive to light, temperature and the presence of oxygen, so their storage conditions may have also been important.<sup>17,30</sup>

A strength of this study is that it had a relatively large sample size when compared with all identical studies found in the literature.<sup>33-44</sup> The models also were analysed using software to reduce the error associated with linear measurements; thus, a greater number of reference markers was used, which decreased the risk of bias.<sup>31,36</sup>

In fixed prosthesis, a maximum accuracy of 70  $\mu\text{m}$  is used as the reference value to ensure that there is good adaptation between the prosthetic piece and the dental model, and a maximum value of 200  $\mu\text{m}$  between the dental model and the original is permitted.<sup>28,31,34</sup> Considering the RMS values obtained, we can state that the models reproduced in our study, both conventional and digital, had excellent clinical applicability in fixed prosthodontics.

This study had also limitations, including the fact that an artificial dental cast was used. Although this approach eliminated the risk of distortions associated with the oral environment, it did not make it possible to obtain exactly real values relative to those found in clinical practice. Additionally, differences in the methods used in different studies in the literature make it difficult to compare their results.<sup>5</sup>

## **5 CONCLUSIONS**

With this study, we can conclude that there are significant differences in trueness among dental casts reproduced using the conventional, milling or 3D printing methods. The conventional technique showed the best results.

We also conclude that there are significant differences in precision among dental casts reproduced using the conventional, milling or 3D printing methods. The milling technique showed the best results.

Considering the limitations of this study, we can state that, for reproduction of dental casts, the conventional technique offers the best trueness, and the milling technique offers the best precision. However, all casts reproduced in our study, both conventional and digital, had excellent clinical applicability in fixed prosthodontics.

## **FUNDING**

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

## **CONFLICT OF INTEREST**

The authors have no proprietary, financial, or other personal interest of any nature or kind in any product, service, and/or company.

## REFERENCES

1. van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dent Mater.* 2012;28(1):3-12. doi: 10.1016/j.dental.2011.10.014.
2. Baroudi K, Ibraheem SN. Assessment of Chair-side Computer-Aided Design and Computer-Aided Manufacturing Restorations: A Review of the Literature. *J Int Oral Health.* 2015;7(4):96-104.
3. Alghazzawi TF. Advancements in CAD/CAM technology: Options for practical implementation. *J Prosthodont Res.* 2016;60(2):72-84. doi: 10.1016/j.jpor.2016.01.003.
4. Revilla-León M, Özcan M. Additive Manufacturing Technologies Used for Processing Polymers: Current Status and Potential Application in Prosthetic Dentistry. *J Prosthodont.* 2019;28(2):146-158. doi: 10.1111/jopr.12801.
5. Joda T, Zarone F, Ferrari M. The complete digital workflow in fixed prosthodontics: a systematic review. *BMC Oral Health.* 2017;17(1):124. doi: 10.1186/s12903-017-0415-0.
6. Logozzo S, Franceschini G, Kilpela A, Caponi M, Govemi L, Blois L. A comparative analysis of intraoral 3D digital scanners for restorative dentistry. *J Med Technol* 2008;5:1-18. doi: 10.5580/1b90.
7. Yuzbasioglu E, Kurt H, Turunc R, Bilir H. Comparison of digital and conventional impression techniques: evaluation of patients' perception, treatment comfort, effectiveness and clinical outcomes. *BMC Oral Health.* 2014;14:10. doi: 10.1186/1472-6831-14-10.
8. Sawase T, Kuroshima S. The current clinical relevancy of intraoral scanners in implant dentistry. *Dent Mater J.* 2020;39(1):57-61. doi: 10.4012/dmj.2019-285.



9. Logozzo S, Zanetti EM, Franceschini G, Kilpelä A, Mäkyinen A. Recent advances in dental optics – Part I: 3D intraoral scanners for restorative dentistry. *Opt Lasers Eng* 2014;54:203-21. doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.07.017.
10. Patzelt SB, Lamprinos C, Stampf S, Att W. The time efficiency of intraoral scanners: an in vitro comparative study. *J Am Dent Assoc.* 2014;145(6):542-51. doi: 10.14219/jada.2014.23.
11. Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *Br Dent J.* 2008;204(9):505-11. doi: 10.1038/sj.bdj.2008.350.
12. Petrovic V, Gonzalez JVH, Ferrando OJ, Gordillo JD, Puchades JRB, Griñan LP. Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies. *Int J Prod Res* 2011;49:1061-79. doi: 10.1080/00207540903479786.
13. Koch GK, Gallucci GO, Lee SJ. Accuracy in the digital workflow: From data acquisition to the digitally milled cast. *J Prosthet Dent.* 2016;115(6):749-54. doi: 10.1016/j.prosdent.2015.12.004.
14. Patzelt SB, Emmanouilidi A, Stampf S, Strub JR, Att W. Accuracy of full-arch scans using intraoral scanners. *Clin Oral Investig.* 2014;18(6):1687-94. doi: 10.1007/s00784-013-1132-y.
15. Bosch G, Ender A, Mehl A. A 3-dimensional accuracy analysis of chairside CAD/CAM milling processes. *J Prosthet Dent.* 2014;112(6):1425-31. doi: 10.1016/j.prosdent.2014.05.012.
16. Schmitz TL, Ziegert JC, Canning JS, Zapata R. Case study: a comparison of error sources in high-speed milling. *Precis Eng* 2008;32:126-33. doi: 10.1016/j.precisioneng.2007.06.001.

17. Berman B. 3-D printing: the new industrial revolution. *Bus Horiz* 2012;55:155-62. Doi: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.
18. Javaid M, Haleem A. Current status and applications of additive manufacturing in dentistry: a literature-based review. *J Oral Biol Craniofac Res* 2019;9:179-85. doi: 10.1016/j.jobcr.2019.04.004.
19. Braian M, Jimbo R, Wennerberg A. Production tolerance of additive manufactured polymeric objects for clinical applications. *Dent Mater*. 2016;32(7):853-61. doi: 10.1016/j.dental.2016.03.020.
20. Loflin WA, English JD, Borders C, Harris LM, Moon A, Holland JN et al. Effect of print layer height on the assessment of 3D-printed models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2019;156(2):283-289. doi: 10.1016/j.ajodo.2019.02.013.
21. Zhang ZC, Li PL, Chu FT, Shen G. Influence of the three-dimensional printing technique and printing layer thickness on model accuracy. *J Orofac Orthop*. 2019;80(4):194-204. doi: 10.1007/s00056-019-00180-y.
22. Chockalingam K, Jawahar N, Chandrasekhar U. Influence of layer thickness on mechanical properties in stereolithography. *Rapid Prototyp J* 2006;12:106-13. doi: 10.1108/13552540610652456.
23. International Organization for Standardization. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 1: General principles and definitions. 1st ed. ISO 5725-1 1994.
24. Kim SY, Lee SH, Cho SK, Jeong CM, Jeon YC, Yun MJ et al. Comparison of the accuracy of digitally fabricated polyurethane model and conventional gypsum model. *J Adv Prosthodont*. 2014;6(1):1-7. doi: 10.4047/jap.2014.6.1.1.



25. Cho SH, Schaefer O, Thompson GA, Guentsch A. Comparison of accuracy and reproducibility of casts made by digital and conventional methods. *J Prosthet Dent.* 2015 Apr;113(4):310-5. doi: 10.1016/j.prosdent.2014.09.027.
26. Al-Imam H, Gram M, Benetti AR, Gotfredsen K. Accuracy of stereolithography additive casts used in a digital workflow. *J Prosthet Dent.* 2018;119(4):580-585. doi: 10.1016/j.prosdent.2017.05.020.
27. Sim JY, Jang Y, Kim WC, Kim HY, Lee DH, Kim JH. Comparing the accuracy (trueness and precision) of models of fixed dental prostheses fabricated by digital and conventional workflows. *J Prosthodont Res.* 2019;63(1):25-30. doi: 10.1016/j.jpor.2018.02.002.
28. Keating AP, Knox J, Bibb R, Zhurov AI. A comparison of plaster, digital and reconstructed study model accuracy. *J Orthod.* 2008;35(3):191-201; discussion 175. doi: 10.1179/146531207225022626.
29. Kasparova M, Grafova L, Dvorak P, Dostalova T, Prochazka A, Eliasova H et al. Possibility of reconstruction of dental plaster cast from 3D digital study models. *Biomed Eng Online.* 2013;12:49. doi: 10.1186/1475-925X-12-49.
30. Camardella LT, Vilella OV, van Hezel MM, Breuning KH. Accuracy of stereolithographically printed digital models compared to plaster models. *J Orofac Orthop.* 2017;78(5):394-402. doi: 10.1007/s00056-017-0093-1.
31. Jin SJ, Kim DY, Kim JH, Kim WC. Accuracy of Dental Replica Models Using Photopolymer Materials in Additive Manufacturing: In Vitro Three-Dimensional Evaluation. *J Prosthodont.* 2019;28(2):e557-e562. doi: 10.1111/jopr.12928.

32. Park ME, Shin SY. Three-dimensional comparative study on the accuracy and reproducibility of dental casts fabricated by 3D printers. *J Prosthet Dent.* 2018;119(5):861.e1-861.e7. doi: 10.1016/j.prosdent.2017.08.020.
33. Patzelt SB, Bishti S, Stampf S, Att W. Accuracy of computer-aided design/computer-aided manufacturing-generated dental casts based on intraoral scanner data. *J Am Dent Assoc.* 2014;145(11):1133-40. doi: 10.14219/jada.2014.87.
34. Yau HT, Yang T, Lin Y. Comparison of 3-D printing and 5-axis milling for the production of dental e-models from intra-oral scanning. *Comput Aided Des Appl* 2016;13(1):32-8. Doi: 10.1080/16864360.2015.1059186.
35. Jeong YG, Lee WS, Lee KB. Accuracy evaluation of dental models manufactured by CAD/CAM milling method and 3D printing method. *J Adv Prosthodont.* 2018;10(3):245-251. doi: 10.4047/jap.2018.10.3.245.
36. Choi JW, Ahn JJ, Son K, Huh JB. Three-Dimensional Evaluation on Accuracy of Conventional and Milled Gypsum Models and 3D Printed Photopolymer Models. *Materials (Basel).* 2019;12(21):3499. doi: 10.3390/ma12213499.
37. Alharbi N, Alharbi S, Cuijpers VMJ, Osman RB, Wismeijer D. Three-dimensional evaluation of marginal and internal fit of 3D-printed interim restorations fabricated on different finish line designs. *J Prosthodont Res.* 2018;62(2):218-226. doi: 10.1016/j.jpor.2017.09.002.
38. Mai HN, Lee KB, Lee DH. Fit of interim crowns fabricated using photopolymer-jetting 3D printing. *J Prosthet Dent.* 2017;118(2):208-215. doi: 10.1016/j.prosdent.2016.10.030.

39. Lee WS, Lee DH, Lee KB. Evaluation of internal fit of interim crown fabricated with CAD/CAM milling and 3D printing system. *J Adv Prosthodont.* 2017;9(4):265-270. doi: 10.4047/jap.2017.9.4.265.
40. Homsy FR, Özcan M, Khoury M, Majzoub ZAK. Marginal and internal fit of pressed lithium disilicate inlays fabricated with milling, 3D printing, and conventional technologies. *J Prosthet Dent.* 2018;119(5):783-790. doi: 10.1016/j.prosdent.2017.07.025.
41. Jang Y, Sim JY, Park JK, Kim WC, Kim HY, Kim JH. Accuracy of 3-unit fixed dental prostheses fabricated on 3D-printed casts. *J Prosthet Dent* 2020;123:135-42. doi: 10.1016/j.prosdent.2018.11.004.
42. Pompa G, Di Carlo S, De Angelis F, Cristalli MP, Annibali S. Comparison of Conventional Methods and Laser-Assisted Rapid Prototyping for Manufacturing Fixed Dental Prostheses: An In Vitro Study. *Biomed Res Int.* 2015;2015:318097. doi: 10.1155/2015/318097.
43. Khaledi AA, Farzin M, Akhlaghian M, Pardis S, Mir N. Evaluation of the marginal fit of metal copings fabricated by using 3 different CAD-CAM techniques: Milling, stereolithography, and 3D wax printer. *J Prosthet Dent.* 2020;124(1):81-86. doi: 10.1016/j.prosdent.2019.09.002.
44. Presotto AGC, Barão VAR, Bhering CLB, Mesquita MF. Dimensional precision of implant-supported frameworks fabricated by 3D printing. *J Prosthet Dent.* 2019;122(1):38-45. doi: 10.1016/j.prosdent.2019.01.019.
45. Viegas DC, Mourão JT, Roque JC, Riquieri H, Fernandes J, Arrobas F, Diamantino P, Saavedra G. Evaluation of the influence of the impression technique, scanning

- direction and type of scanner on the accuracy of the final model. *Braz Dent Sci*, 2021;24(1). Doi: 10.14295/bds.2021.v24i1.2179.
46. Hair JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE, Tatham RL. *Multivariate Data Analysis*. 7<sup>th</sup> ed. Edinburgh: Pearson New Internacional Edition, 2005;
  47. Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioural sciences*. 2nd ed. New York: Academic Press, 1988;
  48. Erdfelder E, Faul F, Buchner A, Lang AG. Statistical power analyses using G\*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*. 2009;41(4):1149–1160. doi: 10.3758/BRM.41.4.1149;
  49. Menditto A, Patriarca M, Magnusson B. Understanding the meaning of accuracy, trueness and precision. *Accredit Qual Assur* 2007;12(1):45-7. doi: 10.1007/s00769-006-0191-z
  50. 3Shape A/S. Trios 3. Copenhagen, Denmark. [Cited 2020 October 10] Available from: <https://www.3shape.com/en/scanners/trios-3>.
  51. Medina-Sotomayor P, Pascual-Moscardó A, Camps I. Relationship between resolution and accuracy of four intraoral scanners in complete-arch impressions. *J Clin Exp Dent*. 2018 Apr 1;10(4):e361-e366. doi: 10.4317/jced.54670.
  52. Anusavice K. *Phillips' science of dental materials*. 11th ed. St. Louis, Missouri: Elsevier; 2003. p. 223-30.
  53. Anusavice K. *Phillips' science of dental materials*. 11th ed. St. Louis, Missouri: Elsevier; 2003. p. 273-6.
  54. Scanner S600 Arti. Zirkonzahn. Copenhagen, Italy. [Cited 2021 May 30] Available from: <https://zirkonzahn.com/pt/sistemas-cad-cam/scanner-s600-arti>.

## TABLES

Table 1. Evaluation of the effect of process type on trueness.

Table 2. Evaluation of the effect of process type on trueness: Multiple comparisons.

Table 3. Evaluation of the effect of process type on precision.

Table 4. Evaluation of the effect of process type on precision: Multiple comparisons.

## FIGURES

Fig. 1. Palatal (A), vestibular (B) and occlusal (C) views of the reference model.

Fig. 2. Vestibular (A) and palatal (B) views of an individual tray made using the reference model.

Fig. 3. Representative image of the M4 milling unit (ZirkonZahn GmbH, Bruneck, Italy) used in this study. Available at <https://www.zirkonzahn.com/en/cad-cam-systems/milling-unit-m4>. Access September 2020.

Fig. 4. Representative image of the Form 2 printer (Formlabs, Inc., Massachusetts, USA) used in this study. Available at <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/>. Access September 2020.

Fig. 5. Representation of the digital model analysis method with Geomagic Control X software (Viegas *et al.* 2021)

Fig. 6. Boxplots of trueness by process type.

Fig. 7. Boxplots of precision by process type.